ELECTRICIDAD

HARRY MILEAF

1-7

EDITORIAL LIMUSA

MÉXICO • ESPAÑA • VENEZUELA • ARGENTINA
COLOMBIA • PUERTO RICO

Título de la obra en inglés
ELECTRICITY ONE–SEVEN
© Hayden Book Company, Inc.

Versión española:

Ing. LIONEL DIGNOWITY
Catedrático de la Escuela Militar de
Ingenieros y Excatedrático de la
Escuela Militar de Transmisiones

Revisión técnica:

Ing. DANIEL BARRIOS MORALES FRIAS
Profesor Titular de Electrónica en
la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de
México.
Jefe de la Oficina de Normalización
y Automatización del Departamento de
Laboratorio de la Comisión Federal de
Electricidad.

Ing. CANDIDO PEREZ VEGA
Profesor de Teoría de los Circuitos en la Escuela Superior
de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico
Nacional de México y en la Universidad Anáhuac.

La presentación y disposición en conjunto de
ELECTRICIDAD SERIE 1–7
son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra
puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema
o método electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado,
la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento
de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Derechos reservados:

© 1985, EDITORIAL LIMUSA, S. A. de C. V.
Balderas 95, Primer piso, 06040 México 1, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial. Registro Núm. 121

Primera edición: 1979
Primera reimpresión: 1981
Segunda reimpresión: 1983
Tercera reimpresión: 1985
Impreso en México
(4927)

ISBN 968 – 18 – 0973 – 4

prólogo

Este es un volumen de siete partes, escrito especialmente para impartir un curso de electricidad. El libro está organizado de tal forma que sigue una secuencia que facilita el aprendizaje: cada parte abarca determinada área de conocimientos y, además, prepara al lector para el estudio de las partes subsecuentes. Los temas expuestos se desarrollan progresivamente y cada uno sirve de base para el siguiente. Cada *nuevo concepto* o *idea* se presenta por separado, dedicándose una página entera al texto correspondiente y a la gráfica que lo ilustra. Con esta presentación, ni los textos ni los dibujos por sí solos son autosuficientes como medio de enseñanza. Para *cada* tema se proporcionan ambos, de modo que las ilustraciones no sólo complementan el texto, sino que lo refuerzan. Además, las leyendas de las gráficas ayudan al estudiante a retener lo que ha aprendido, ya que le proporcionan una especie de resumen de los puntos más importantes. Por su forma especial de presentar la información, esta obra es muy adecuada para usarse como libro de consulta.

De acuerdo con las buenas prácticas pedagógicas, todos los términos técnicos se definen en el momento en que se usan por primera vez, a fin de que los estudiantes prosigan el curso con confianza. Un recurso que facilita las cosas tanto al maestro como al estudiante consiste en usar cursivas para destacar las palabras clave de cada tema. Los principales puntos de las secciones anteriores, a menudo, se repiten más adelante para fijarlos bien en la memoria del alumno. Este método no sólo permite vincular un tema con otro, sino que proporciona el reforzamiento necesario, cuando ya se comienza a olvidar lo apenas aprendido. Después de cada grupo de temas que constituyen la "lección diaria", el alumno encontrará un resumen de los datos estudiados y una sección con preguntas de repaso respecto a los mismos.

Gran parte del trabajo requerido para preparar este volumen, la realizaron los miembros del excelente equipo de autores, redactores y asesores técnicos organizado por la casa editora. A ellos les corresponde el mayor elogio. Asimismo, debo reconocer la ayuda que nos brindaron las siguientes personas: Frank T. Egan, Jack Greenfield y Warren W. Yates, nuestros principales colaboradores; Peter J. Zurita, Steven Barbash, Solomon Flam y A. Victor Schwarz de nuestro equipo editorial; Paul J. Barotta, Director del Union Technical Institute; Albert J. Marcarelli, Director Técnico de la Connecticut School of Electronics; Howard

Bierman, Editor de *Electronic Design;* E. E. Grazda, Director del Departamento Editorial de la misma revista, e Irving Lopatin, Director del Departamento Editorial de la empresa Hayden Book Companies.

Coordinador del Proyecto

HARRY MILEAF

contenido

PARTE UNO

Introducción ---------- **1–1**

Importancia de la electricidad ☐ Historia ☐ ¿Qué es la electricidad?

Estructura de la materia ---------- **1–4**

¿Qué es la materia? ☐ Los elementos ☐ Compuestos ☐ La molécula ☐ El átomo

Teoría atómica ---------- **1–9**

Estructura del átomo ☐ El núcleo ☐ El protón ☐ El electrón

Cargas eléctricas ---------- **1–14**

Ley de las cargas eléctricas ☐ Cargas atómicas ☐ Materiales eléctricamente cargados ☐ Carga por contacto ☐ Carga por inducción ☐ Neutralización de una carga ☐ Atracción y repulsión ☐ Campos electrostáticos

Teoría electrónica ---------- **1–23**

Orbitas electrónicas ☐ Capas o bandas orbitales ☐ Elementos y sus capas atómicas ☐ Capacidad de las bandas ☐ Banda exterior (de valencia) ☐ Energía del electrón ☐ Cuándo se produce la electricidad ☐ Con-

ductores ☐ Aisladores ☐ Compuestos aislantes ☐ Semiconductores ☐ Comparación de los conductores ☐ Comparación de los conductores, aisladores y semiconductores

Cómo se produce la electricidad ---------- **1–37**

Métodos para producir electricidad ☐ Electricidad producida por fricción ☐ Electricidad producida por reacciones químicas ☐ Electricidad producida por presión ☐ Electricidad producida por calor ☐ Electricidad producida por luz ☐ Electricidad producida por el magnetismo

Corriente eléctrica ---------- **1–45**

¿Qué es la corriente eléctrica? ☐ Electrones libres ☐ Movimiento de los electrones ☐ Flujo de corriente ☐ El impulso de corriente ☐ Velocidad de la corriente eléctrica ☐ El circuito completo (cerrado) ☐ Circuito abierto ☐ Fuente de energía eléctrica ☐ Usos prácticos de la electricidad ☐ Unidades eléctricas de medida ☐ Fuerza electromotriz (tensión) ☐ Cantidad de corriente

Efectos de la electricidad ---------- **1–59**

Efectos de la electricidad ☐ La electricidad produce actividad química ☐ La electricidad produce presión ☐ La electricidad produce calor ☐ La electricidad produce luz ☐ La electricidad produce magnetismo

Magnetismo ---------- **1–66**

Magnetismo ☐ Magnetismo y el electrón ☐ La molécula magnética ☐ Materiales magnéticos ☐ Magnetización del hierro ☐ Cómo se desmagnetiza un imán ☐ Campo magnético terrestre ☐ Polaridades magnéticas ☐ La brújula magnética ☐ Atracción y repulsión ☐ Campo magnético ☐ Líneas de fuerza ☐ Interacción de los campos magnéticos ☐ Blindaje magnético

Electromagnetismo ---------- **1–81**

¿Qué es electromagnetismo? ☐ Electromagnetismo en un conductor ☐ Intensidad de campo ☐ Interacción de los campos electromagnéticos ☐ El electromagnetismo

en una espira ☐ Electromagnetismo en una bobina ☐ El núcleo magnético ☐ Fuerza magnetomotriz

Aplicaciones de la electricidad y el magnetismo ——— **1–90**

La electricidad y el magnetismo como fuentes de energía ☐ La luz incandescente ☐ El calentador eléctrico ☐ El timbre electromagnético ☐ Interruptor electromagnético ☐ Aparato telegráfico básico ☐ Motor eléctrico ☐ Instrumento de medición ☐ El generador básico

PARTE DOS

El circuito eléctrico ——— **2–1**

Uso de la electricidad ☐ El circuito eléctrico ☐ El interruptor ☐ La carga ☐ Fuente de energía ☐ Circuito de corriente directa ☐ ¿Qué es lo que controla el flujo de corriente? ☐ Conductancia

Resistencia ——— **2–10**

Resistencia ☐ Resistencia de los diferentes conductores ☐ Cómo puede reducirse la resistencia ☐ Cómo puede aumentarse la resistencia ☐ Cómo se controla la resistencia ☐ Efecto de la temperatura ☐ Unidad de resistencia ☐ La resistencia de los alambres ☐ ¿Cuánta corriente puede conducir un alambre? ☐ Resistencia de la carga y de la fuente de energía ☐ Resistencia total del circuito

Resistores ——— **2–23**

Resistores ☐ Uso de los resistores ☐ Tolerancia ☐ Dosificación de corriente ☐ Tipos de resistores ☐ Resistores de composición ☐ Resistores devanados ☐ Resistores de película ☐ Resistores fijos ☐ Resistores ajustables ☐ Resistores variables ☐ Código de color de resistores ☐ Código de color de resistores estándar

Ley de Ohm ——— **2–37**

Ley de Ohm ☐ Ecuaciones ☐ Cálculo de la corriente ☐ Cálculo de la resistencia ☐ Cálculo de la tensión

Potencia ---------- **2–44**

Potencia ☐ La unidad de potencia ☐ Ecuaciones ☐ Ecuaciones de resistencia ☐ Pérdidas de potencia ☐ Clasificación de resistores por potencia ☐ Clasificación de potencia de las lámparas incandescentes ☐ Clasificaciones típicas de consumo ☐ El kilowatt-hora

Circuitos en serie ---------- **2–54**

Unidades eléctricas básicas ☐ Circuitos en serie ☐ Cargas en serie ☐ Forma en que las cargas en serie afectan la corriente ☐ Fuentes de energía en serie ☐ Forma en que las fuentes de energía en serie afectan la corriente ☐ Fuentes de energía en oposición conectadas en serie ☐ Consumo de potencia ☐ Caída de tensión ☐ Cálculo de la caída de tensión ☐ Polaridad ☐ Polaridad y tensión de un punto ☐ Circuito de potenciómetro ☐ Circuitos abiertos ☐ Corto circuito ☐ El fusible ☐ Problemas resueltos

Circuitos en paralelo ---------- **2–75**

Circuitos en paralelo ☐ Cargas en paralelo ☐ Caída de tensión en cargas en paralelo ☐ Efecto de cargas en paralelo sobre la corriente ☐ Cálculo de las corrientes de rama ☐ Cálculo de la corriente total ☐ Cómo calcular la resistencia total ☐ Resistencias iguales en paralelo ☐ Dos resistencias desiguales en paralelo ☐ Tres o más resistencias desiguales en paralelo ☐ Cómo calcular la resistencia total a partir de la corriente y la tensión Fuentes de energía en paralelo ☐ Efecto de fuentes de energía en paralelo sobre la corriente ☐ Consumo de potencia ☐ Circuitos abiertos ☐ Cortos circuitos ☐ Problemas resueltos

Comparación de circuitos en serie y en paralelo ---------- **2–97**

Circuitos en serie-paralelo ---------- **2–99**

Circuitos en serie-paralelo ☐ Análisis de circuitos en serie-paralelo ☐ Diagramas de circuitos en serie-paralelo ☐ Reducción de circuitos en serie-paralelo ☐ Corriente ☐ Tensión ☐ Cómo calcular la tensión y la corriente ☐ Problemas resueltos

Leyes de Kirchhoff ---------- **2–114**

Leyes de Kirchhoff ☐ Ley de Kirchhoff de tensión ☐ Aplicación de la ley de Kirchhoff de tensión ☐ Ley de Kirchhoff de corriente ☐ Aplicación de las leyes de Kirchhoff

Principio de superposición ---------- **2–119**

Resistencia interna de las fuentes de energía ---------- **2–120**

Fallas en los circuitos de C.C. ---------- **2–121**

Fallas en circuitos de C.C. ☐ Fallas en fuentes de energía ☐ Fallas en resistores ☐ Falla en otras cargas ☐ Fallas en dispositivos auxiliares

PARTE TRES

Corriente alterna ---------- **3–1**

¿Qué es corriente alterna? ☐ ¿Es útil la corriente alterna? ☐ ¿Por qué se utiliza la corriente alterna? ☐ Transmisión de energía eléctrica ☐ Pérdidas de potencia por transmisión ☐ Transmisión de potencia de C. A. ☐ Otras características de la C. A. ☐ La fuente de energía de C. A. ☐ Un generador elemental de C. A.

Formas de onda de C. A. ---------- **3–11**

Movimiento angular ☐ Formas de onda de C. A. ☐ Formas de onda de C. A. y de C. C. ☐ La onda sinusoidal ☐ Cómo se genera una onda sinusoidal ☐ Simetría en las formas de onda ☐ Ondas cuadradas ☐ Cómo se genera una onda cuadrada ☐ Ondas "diente de sierra" ☐ C. C. fluctuante ☐ Componente de C. A.

Características de C. A. ---------- **3–23**

Frecuencia ☐ Longitud de onda ☐ Fase ☐ Diferencia de fase ☐ Otros términos relativos a la C. A. ☐ Valores de tensión y corriente alterna ☐ Valores medios ☐ Valores efectivos ☐ Valores de conversión

Circuitos resistivos de C. A. ---------- **3–33**

Circuitos resistivos de C. A. ☐ Corriente y tensión ☐ Relaciones de fase ☐ Potencia ☐ Corrientes circulantes y efecto superficial ☐ Problemas resueltos

Circuitos no resistivos de C. A. ---------- **3–42**

Efectos del electromagnetismo ---------- **3–43**

Campo magnético alrededor de un conductor ☐ Fem inducida ☐ Factores que determinan la fem inducida ☐ Campo magnético originado por una corriente alterna ☐ Autoinducción ☐ Magnitud de la fem autoinducida ☐ Polaridad de la fem autoinducida ☐ Autoinducción con respecto a energía ☐ Efecto que tiene la forma del conductor sobre la autoinducción

Inductancia ---------- **3–54**

Inductancia ☐ Inductores ☐ Factores que determinan la inductancia ☐ Valores de inductancia y fcem

Circuitos inductivos de C. C. ---------- **3–58**

Circuitos inductivos de C. C. ☐ Constante de tiempo ☐ Corrientes en aumento y en descenso ☐ Aumento y disminución de la inductancia y sus efectos

Circuitos inductivos de C. A. ---------- **3–62**

Circuitos inductivos de C. A. ☐ Relaciones de tensión y corriente alterna ☐ Reactancia inductiva ☐ Inductores en serie y paralelo ☐ Problemas resueltos

Inductancia mutua ---------- **3–71**

Inducción mutua ☐ Inductancia mutua

Transformadores ---------- **3–73**

El transformador ☐ Cómo funciona un transformador con secundario abierto ☐ Tensión y corriente ☐ Cómo funciona un transformador con secundario cargado ☐

Tensión y corriente ☐ Efecto que tiene la carga sobre las fases ☐ Potencia primaria y secundaria ☐ Relación existente entre espiras, tensión y corriente ☐ Transformadores de secundario múltiple

Tipos de transformadores ---------- **3–85**

Tipos de transformadores ☐ Transformadores de núcleo de hierro y de núcleo de aire ☐ El autotransformador ☐ El transformador ajustable

Pérdidas en transformadores ---------- **3–90**

Pérdidas en un transformador ☐ Pérdidas en el cobre y fugas ☐ Pérdidas por histéresis ☐ Ciclo de histéresis ☐ Pérdidas por corrientes parásitas ☐ Pérdidas por saturación

Circuitos RL ---------- **3–97**

Capacitancia y capacitores ---------- **3–98**

Capacitancia y el capacitor ☐ Carga de un capacitor ☐ El campo eléctrico ☐ Cómo se carga un capacitor en un circuito de C. C. ☐ Descarga de un capacitor ☐ Descarga de un capacitor en un circuito de C. C. ☐ Unidad de capacitancia ☐ Constante capacitiva de tiempo

Capacitancia y capacitores ---------- **3–109**

Factores que influyen en los valores de capacitancia ☐ Efecto del área de las placas ☐ Efecto de la separación entre las placas ☐ Efecto del dieléctrico ☐ Constante dieléctrica y resistencia dieléctrica

Circuitos capacitivos de C. C. ---------- **3–115**

Circuitos capacitivos de C. A. ---------- **3–117**

Circuitos capacitivos de C. A. ☐ Relaciones entre tensión y carga ☐ Relaciones entre tensión y corriente ☐ Efecto que tiene la frecuencia en la corriente del capacitor ☐ Efecto que tiene la capacitancia en la co-

rriente del capacitor ☐ Reactancia capacitiva ☐ Resistancia de fuga ☐ Capacitores en serie ☐ Capacitores en paralelo ☐ Problemas resueltos

Circuitos capacitivos de C. C. fluctuante ---------- **3–131**

Factor de potencia ---------- **3–134**

Tipos de capacitores ---------- **3–135**

Tipos de capacitores ☐ Capacitor electrolítico

Código de color para capacitores ---------- **3–139**

Circuitos RC ---------- **3–141**

PARTE CUATRO

Vectores ---------- **4–1**

Introducción ☐ Repaso de los ángulos de fase LCR ☐ ¿Qué es un vector? ☐ Representación gráfica ☐ Operaciones con vectores ☐ Suma de vectores que tienen la misma dirección ☐ Suma de vectores con direcciones opuestas ☐ Suma de vectores por el método del paralelogramo ☐ Suma de vectores por el método del triángulo ☐ Suma de vectores defasados 90 grados ☐ Propiedades del triángulo rectángulo ☐ Resta de vectores Separación de vectores en sus componentes ☐ Suma de vectores por componentes ☐ Vectores asociados con ángulos de fase de ondas sinusoidales ☐ Representación gráfica de vectores rotatorios ☐ Vectores y ondas sinusoidales ☐ Vectores de circuitos puramente resistivos, inductivos y capacitivos ☐ Problemas resueltos

Circuitos RL ---------- **4–25**

Circuitos RL ☐ Impedancia

Circuitos en serie RL ---------- **4–27**

Circuitos en serie RL ☐ Tensión ☐ Formas de onda de tensión ☐ Impedancia y corriente ☐ Potencia ☐ Q de una bobina ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Circuitos en paralelo RL ---------- **4–42**

Circuitos en paralelo RL ☐ Tensión ☐ Corrientes de rama ☐ Corriente de línea ☐ Formas de onda de corriente ☐ Impedancia ☐ Potencia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Comparación de circuitos RL en serie y en paralelo ------ **4–53**

Circuitos RC ---------- **4–55**

Circuitos en serie RC ---------- **4–56**

Circuitos en serie RC ☐ Tensión ☐ Ondas de tensión ☐ Impedancia ☐ Corriente ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Circuitos en paralelo RC ---------- **4–66**

Circuitos en paralelo RC ☐ Tensión ☐ Corriente de rama ☐ Corriente de línea ☐ Ondas de corriente ☐ Impedancia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Comparación de circuitos RC en serie y en paralelo ----- **4–75**

Circuitos LCR ---------- **4–77**

Circuitos en serie LC ---------- **4–78**

Circuitos en serie LC ☐ Tensión ☐ Ondas de tensión ☐ Impedancia ☐ Corriente ☐ Potencia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Circuitos en serie LCR ---------- **4–89**

Circuitos en serie LCR ☐ Tensión ☐ Ondas de ten-

sión ☐ Impedancia ☐ Corriente ☐ Potencia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Resonancia en serie ---------- **4–101**

Resonancia en serie ☐ Factores que determinan la resonancia ☐ Impedancia en resonancia y fuera de resonancia ☐ Corriente en resonancia y fuera de resonancia ☐ Banda de resonancia ☐ Efecto que tiene la resistencia en la banda de resonancia ☐ Calidad ☐ Aplicaciones prácticas ☐ Problemas resueltos

Circuitos en paralelo ---------- **4–114**

Circuitos en paralelo LC ☐ Tensión ☐ Corriente ☐ Ondas de corriente ☐ Impedancia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Circuitos en paralelo LCR ---------- **4–123**

Circuitos en paralelo LCR ☐ Tensión ☐ Corriente ☐ Ondas de corriente ☐ Impedancia ☐ Efecto de la frecuencia ☐ Problemas resueltos

Resonancia en paralelo ---------- **4–132**

Resonancia en paralelo ☐ Circuito tanque ☐ Corriente e impedancia en resonancia ☐ Corriente e impedancia fuera de resonancia ☐ Circuitos resonantes en paralelo reales ☐ Banda de resonancia ☐ Q de un circuito resonante en paralelo ☐ Problemas resueltos

Comparación de circuitos resonantes en serie y en paralelo **4–144**

Circuitos sintonizados ---------- **4–147**

Circuitos en serie y paralelo, RL, RC y LCR ---------- **4–146**

Circuitos de filtro ---------- **4–148**

Circuitos de filtro ☐ Tipos básicos

Vectores de transformadores ---------- **4–150**

Vectores de transformadores ☐ Vectores de transformadores resonantes

Acoplamiento de impedancia ---------- **4–153**

PARTE CINCO

Introducción ---------- **5–1**

Necesidad de equipo de prueba ☐ El medidor básico ☐ El medidor de corriente ☐ Repaso de electromagnetismo ☐ Atracción ☐ Repulsión ☐ Forma en que las corrientes afectan a un campo magnético.

Mecanismos del medidor ---------- **5–9**

Tipos de medidores de corriente electromagnéticos ☐ Mecanismo del medidor de bobina móvil ☐ Mecanismo del medidor de hierro móvil ☐ Mecanismo del medidor de álabes concéntricos ☐ Mecanismo del medidor de émbolo móvil ☐ Amperímetro térmico ☐ Medidor de termopar.

Estructura del medidor ---------- **5–17**

Partes del mecanismo de un medidor ☐ Mecanismo del medidor de bobina móvil (d'Arsonval) ☐ Imanes permanentes ☐ Medidores de hierro móvil ☐ Paletas y álabes de hierro ☐ Bobinas ☐ Agujas ☐ Resortes ☐ Ajuste en cero.
Pivotes, cojinetes y pernos de retención ☐ Escalas para medidores de bobina móvil ☐ Escalas para medidores de hierro móvil ☐ Amortiguamientos ☐ Amortiguamiento en un medidor de bobina móvil ☐ Amortiguamiento en un medidor de hierro móvil ☐ Escalas para medidores de termopar ☐ Estructura de termopares.

Características del medidor ---------- **5–38**

Resistencia interna y sensibilidad ☐ Precisión del medidor.

Medidores de c-c y c-a ---------- **5–40**

¿Qué medidores sirven para c-c y para c-a?

Medidores con rectificador ---------- **5–41**

Repaso de c-a ☐ Valores RCM y medio de una onda sinusoidal ☐ Rectificadores ☐ Medidor con rectificador de media onda ☐ Medidor con rectificador de onda completa.

Calibración y precisión de los medidores ---------- **5–47**

Calibración de medidores de c-c y c-a ☐ Precisión de los medidores de c-c y c-a ☐ Respuesta de frecuencia.

Rangos de los amperímetros ---------- **5–51**

Derivados ☐ Flujo de corriente en circuitos en paralelo ☐ Caídas de voltaje en circuitos en paralelo ☐ Ecuación del derivador ☐ Cálculo de la resistencia en derivación ☐ Lectura de un medidor con derivador ☐ Problemas resueltos.

Amperímetros de alcance múltiple ---------- **5–60**

Medidores de corriente de alcance múltiple ☐ Cálculo de la resistencia de derivadores de alcance múltiple ☐ Problemas resueltos ☐ Derivadores en anillo ☐ Ecuación del derivador en anillo ☐ Cálculo de la resistencia de un derivador en anillo ☐ Problemas resueltos.

Medición de corriente ---------- **5–72**

Conexión de un medidor de corriente en un circuito ☐ Conexión en paralelo de un medidor de corriente ☐ Amperímetro de abrazadera ☐ Lectura de la escala ☐ Parte útil de la escala.

Voltímetros ---------- **5–79**

Uso de un medidor de corriente para medir voltaje ☐ Resistores multiplicadores ☐ Problemas resueltos

☐ Voltímetros de alcance múltiple ☐ Cálculo de la resistencia de multiplicadores de alcance múltiple ☐ Clasificación "ohms por volt" ☐ Clasificación baja de "ohms por volt" ☐ Conexión de un voltímetro a un circuito ☐ Lectura de la escala de un voltímetro.

Ohmímetros ---------- **5–93**

El ohmímetro ☐ El ohmímetro en serie ☐ El ohmímetro con derivador ☐ Ohmímetro en serie de alcance múltiple ☐ Usos del ohmímetro.

Puente de Wheatstone ---------- **5–103**

Megohmímetro ---------- **5–104**

Medidores de potencia ---------- **5–106**

Cálculo de la potencia ☐ Watímetro ☐ El watímetro básico ☐ Comprobación de las pérdidas de potencia del watímetro.

Multímetros ---------- **5–110**

El multímetro básico ☐ Escalas y rangos.

Voltímetro de tubo al vacío ---------- **5–112**

El voltímetro básico de tubo al vacío ☐ Medición de voltaje y resistencia de c-a.

PARTE SEIS

Fuentes de energía ---------- **6–1**

Fuentes de energía ☐ Tipos ☐ La batería ☐ Tipos de baterías ☐ Datos históricos.

Celda húmeda ---------- **6–6**

Celda húmeda primaria básica ☐ Cómo se produce un voltaje ☐ Suministro de corriente ☐ Actividad

interna ☐ Polarización ☐ El electrólito ☐ Electrodos ☐ Limitaciones.

Pila seca ---------- **6–15**

La celda seca primaria básica ☐ Celda seca básica de cinc-carbón ☐ Polarización y actividad interna ☐ Estructura de la celda de Leclanché ☐ Celdas secas a prueba de fugas ☐ Otros tipos de celdas secas ☐ Limitaciones.

Batería secundaria (acumulador) ---------- **6–23**

Celda de plomo-ácido ---------- **6–24**

Celda básica de plomo-ácido ☐ Carga ☐ Electrólisis ☐ El electrodo negativo ☐ El electrodo positivo ☐ El electrólito ☐ Sobrecarga.

Celda de plomo-ácido cargada ☐ Cómo se produce un potencial negativo ☐ Cómo se produce un potencial positivo ☐ Reducción del electrólito ☐ Descarga de la celda de plomo-ácido ☐ Densidad ☐ Métodos de carga ☐ Estructura ☐ Desventajas.

La celda alcalina ---------- **6–44**

Celda alcalina secundaria ☐ Carga ☐ Cómo se produce una fem ☐ Ciclo de descarga ☐ Celdas alcalinas típicas.

Características de una batería ---------- **6–51**

Baterías de celdas múltiples ☐ Tipos de baterías ☐ Voltajes nominales ☐ Resistencia interna ☐ Corrientes nominales.

Otras celdas voltaicas ---------- **6–57**

Otras celdas voltaicas ☐ Celdas fotovoltaicas y termoeléctricas ☐ Celdas solares.

Generadores ---------- **6–61**

Generador de c-c ---------- **6–63**

El generador básico de c-c ☐ Producción de vol-

taje ☐ Polaridades ☐ Producción de una onda sinusoidal ☐ Funcionamiento del conmutador ☐ Aumento del número de espiras ☐ Elevación del voltaje de salida ☐ Producción del campo magnético.

El devanado de campo ---------- **6–75**

Devanado de campo ☐ Devanados de campo múltiples ☐ Excitación del devanado de campo ☐ Generadores en serie ☐ Generadores con derivación ☐ Generadores combinados ☐ Arranque de generadores autoexcitados.

Devanado de armadura ---------- **6–86**

Devanado de armadura ☐ Devanados imbricados ☐ Devanados ondulados.

Plano neutro ---------- **6–91**

Plano neutro ☐ Reacción de armadura ☐ Autoinducción de las bobinas de armadura ☐ Interpolos ☐ Devanados compensadores.

Regulación del voltaje del generador ---------- **6–96**

Estructura del generador de c-c ---------- **6–98**

Estructura ☐ Armadura ☐ Devanado de armadura ☐ El conmutador ☐ Escobillas ☐ Devanado de campo ☐ Cubierta y montaje ☐ Otras características estructurales.

Regulación del generador de c-c ---------- **6–107**

Regulación de un generador de velocidad variable ☐ Regulación de voltaje ☐ Regulación de corriente ☐ Relevador de corte de corriente inversa ☐ Regulación combinada.

Generadores de c-a ---------- **6–115**

Generadores de c-a (alternadores) ☐ Generador básico de c-a ☐ Anillos rozantes ☐ Generación de una salida de onda sinusoidal ☐ Aumento del número de polos ☐ Producción del campo magnético.

Generadores de c-a con armadura estacionaria **6–121**

Fases de salida **6–123**

Generadores de c-a monofásicos □ Generadores de c-a bifásicos □ Generadores de c-a trifásicos □ Conexiones delta e Y □ Características eléctricas de las conexiones delta e Y.

Regulación del generador de c-a **6–130**

Clasificación de los generadores de c-a **6–131**

Estructura de los generadores de c-a **6–132**

Comparación de generadores **6–133**

Alternador de automóvil **6–134**

El alternador de automóvil □ Funcionamiento del alternador de automóvil.

Resistencia interna del generador **6–136**

El motogenerador **6–137**

El dinamotor **6–138**

PARTE SIETE

Motores eléctricos **7–1**

El motor eléctrico □ Movimiento producido por electricidad □ El motor de Faraday.

Motores de c-c **7–4**

Principios del funcionamiento de los motores □ Reglas del funcionamiento de los motores □ Par y movimiento rotatorio □ Cómo se produce una rota-

ción continua □ Conmutador □ Motor elemental de c-c.

Motores prácticos de c-c ---------- **7–12**

Elementos y funcionamiento de un motor de c-c □ Limitaciones del motor elemental de c-c □ Motor de c-c con armadura de dos espiras □ Cómo aumentar la eficiencia de la armadura □ Motor de c-c, con armadura de cuatro espiras □ Funcionamiento □ Conmutación □ Conmutación en la armadura de cuatro espiras □ Plano neutro □ Reacción de armadura □ Interpolos.

Partes del motor de c-c ---------- **7–24**

Estructura □ Núcleo de armadura y eje □ Devanado anular de Gramme □ Armadura devanada en tambor □ Devanados imbricados □ Devanados ondulados □ El conmutador □ Conjunto de escobillas □ Devanado de campo □ Cubierta y montaje □ Chumaceras y enfriamiento.

Motores y generadores ---------- **7–39**

Comparación entre motores y generadores □ Regla de la mano izquierda para generadores y regla de la mano derecha para motores □ Reacción de armadura □ Devanado de interpolos.

Fuerza contraelectromotriz ---------- **7–43**

Fuerza contraelectromotriz □ Repaso de la ley de Lenz □ fcem y contrapar □ Efectos de la fcem □ fcem y la velocidad de un motor □ Carga y la velocidad de un motor □ Intesidad de campo y la velocidad de un motor.

Clasificación de los motores de c-c ---------- **7–51**

Potencia nominal de motores ---------- **7–52**

Motor de derivación ---------- **7–54**

Motor de derivación □ Control de velocidad □ Sensibilidad a fluctuaciones de corriente.

Motor de serie ---------- 7–57

Motor de serie ☐ Sensibilidad a carga nula ☐ Capacidad de arranque.

Sentido de rotación ---------- 7–61

Rotación en motores de c-c ☐ Rotación en el motor de serie ☐ Rotación en el motor de derivación.

Motores *compound* ---------- 7–64

El motor *compound* ☐ Motor *compound* acumulativo ☐ Motor *compound* diferencial.

Tabla comparativa de motores de c-c ---------- 7–68

Arrancadores y controles ---------- 7–70

Arrancadores y dispositivos de control ☐ Clasificación.

Arrancadores ---------- 7–72

Arrancadores de contacto triple para motores de derivación y *compound* ☐ Arrancadores de contacto triple para motores de serie ☐ Arrancadores de contacto doble para motores de serie ☐ Arrancadores de contacto cuádruple para motores de derivación y *compound*.

Controles ---------- 7–78

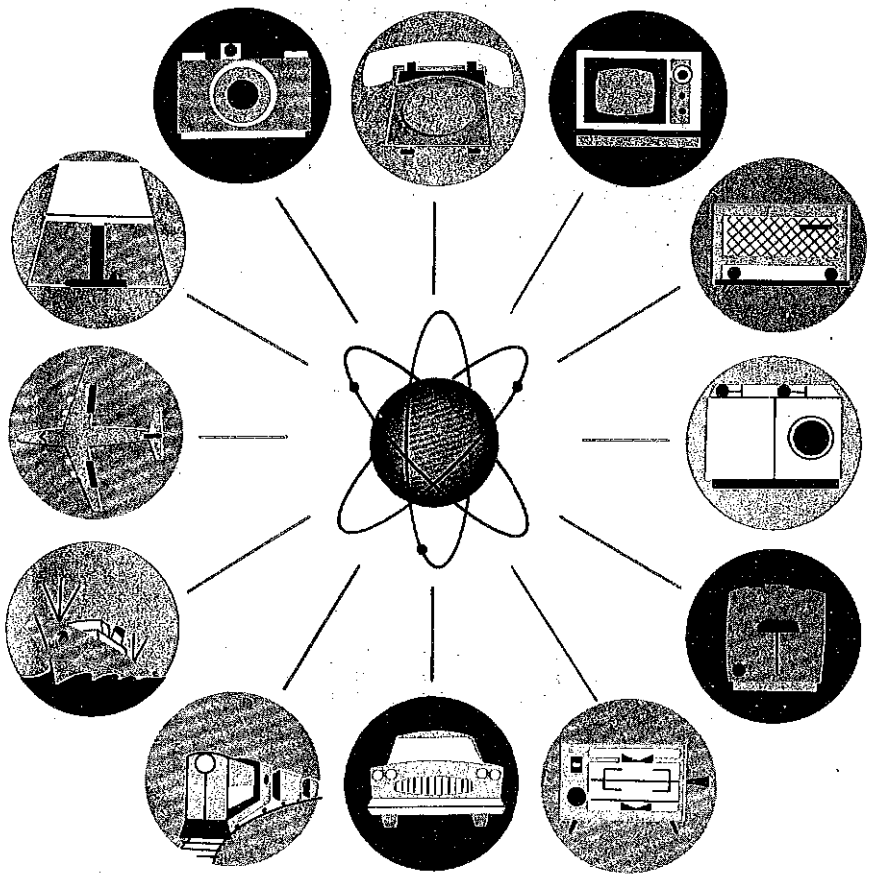
Dispositivos de control para motores ☐ Arranque a velocidad mayor que la normal ☐ Control para velocidad mayor que la normal ☐ Control de velocidades superior e inferior a la normal ☐ Controles de tambor ☐ Control de tambor accionado mecánicamente ☐ Control de tambor accionado eléctricamente ☐ Operación en reversa del control de tambor ☐ Dispositivos de control automático.

Motores de c-a ---------- 7–89

El motor de c-a ☐ Funcionamiento ☐ Rotación del campo de estator ☐ Rotación del campo magnético ☐ Principios de rotación del campo magnético ☐

1

Introducción — Estructura de la materia — Teoría atómica — Cargas eléctricas — Teoría electrónica — Cómo se produce la electricidad — Corriente eléctrica — Efectos de la electricidad — Magnetismo — Electromagnetismo — Aplicaciones de la electricidad y el magnetismo.



importancia de la electricidad

La electricidad es una de las principales formas de energía usadas en el mundo actual. Sin ella, no existiría iluminación conveniente, ni comunicaciones de radio y televisión, ni servicio telefónico, y las personas tendrían que prescindir de aparatos eléctricos que ya llegaron a constituir parte integrante del hogar. Además, sin la electricidad el campo del transporte no sería lo que es en la actualidad. De hecho, puede decirse que la electricidad se usa en todas partes.

Al peinarse el cabello, el peine se carga y se comportará en la misma forma que la antigua varilla de ámbar de los griegos, atrayendo trozos pequeños de papel.

historia

Aunque sólo en los tiempos modernos la electricidad empezó a ser útil, los griegos ya la habían descubierto desde hace 2,000 años. Observaron que un material que nosotros conocemos como ámbar, *Se cargaba* con una fuerza misteriosa, después de frotarlo contra ciertos materiales. El ámbar cargado atraía a cuerpos livianos tales como hojas secas y viruta de madera. Los griegos llamaban al ámbar *elektron*, de donde se ha derivado el nombre de electricidad.

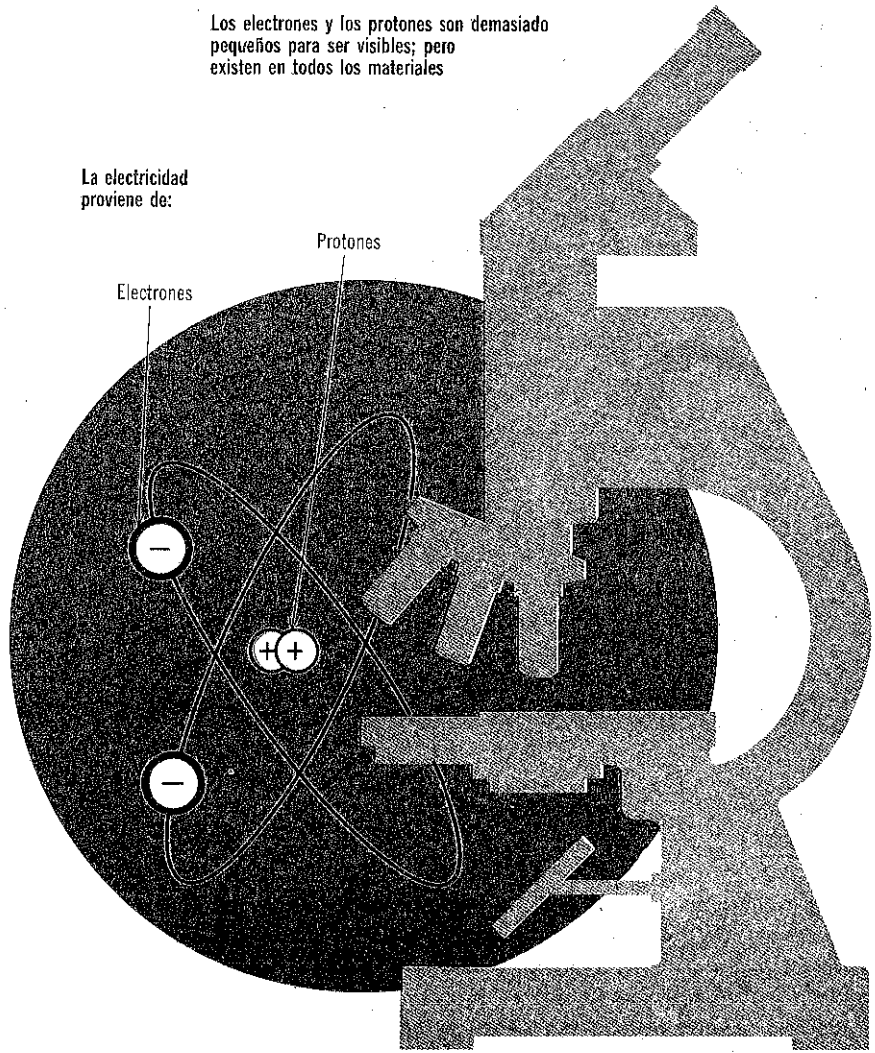
Alrededor del año 1600, William Gilbert clasificaba los materiales en *eléctricos* y *no eléctricos*, según se comportaban como ámbar o no.

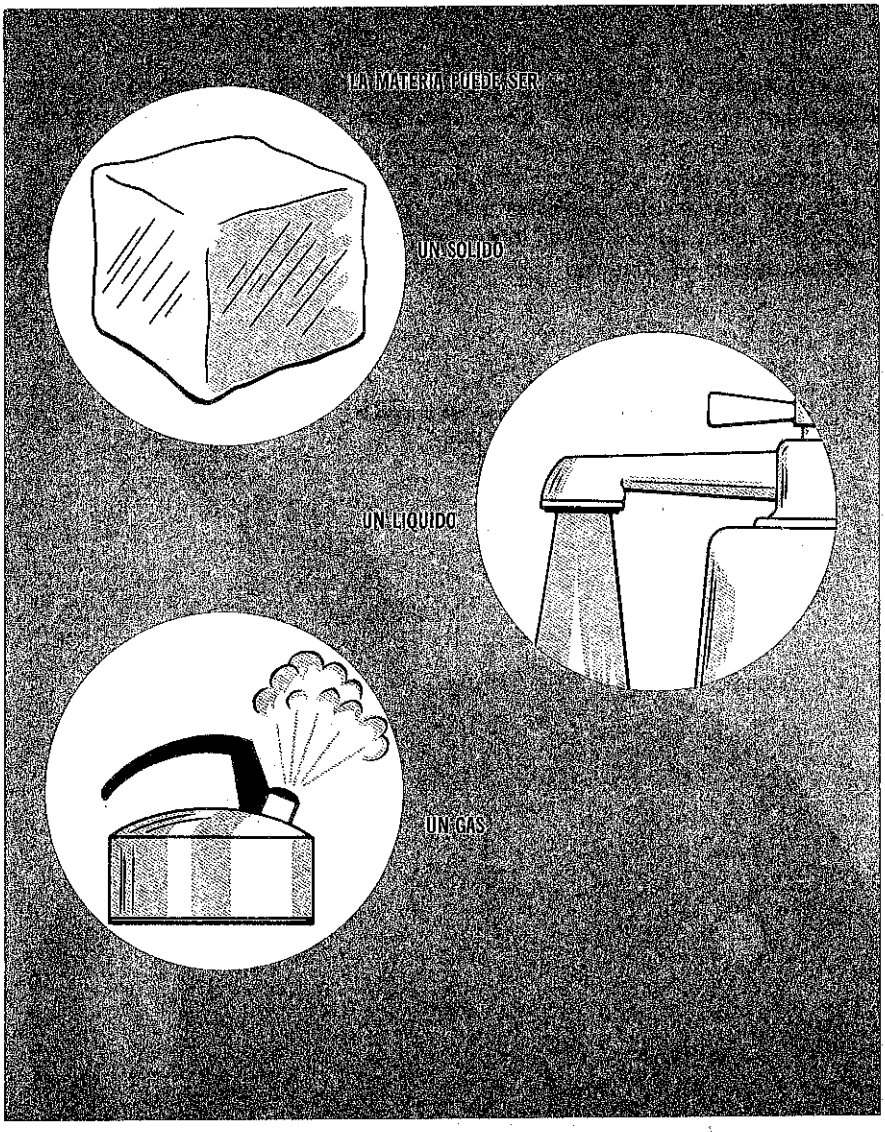
En 1733, un francés, Charles DuFay, observó que un trozo de vidrio eléctricamente cargado *atraía* algunos objetos también cargados, pero que *repelía* a otros objetos cargados. Concluyó entonces que existían dos tipos de electricidad.

Hacia la mitad del siglo XVIII, Benjamin Franklin llamó a estas dos clases de electricidad *positiva* y *negativa*.

¿qué es la electricidad?

En la época de Franklin, los hombres de ciencia consideraban que la electricidad era un "fluido" que podía tener cargas positivas y negativas; pero actualmente, la ciencia considera que la electricidad se produce por partículas muy pequeñas llamadas *electrones* y *protones*. Estas partículas son demasiado pequeñas para verlas, pero existen en todos los materiales. Para que el lector lo comprenda, debemos explicar, ante todo, la estructura de la materia.





¿qué es la materia?

Todo lo que se puede ver, sentir o usar es materia. En realidad, la materia es cualquier cosa que tenga *peso* y que ocupe *espacio*. Puede encontrarse en la forma de un sólido, un líquido o un gas. La roca, la madera y el metal son formas de materia (sólidos), como lo son el agua, el alcohol, o bien la gasolina (líquidos), y no lo son menos el oxígeno, el hidrógeno y el bióxido de carbono (gases).

los elementos

Elementos son los materiales básicos que constituyen toda la materia. El oxígeno y el hidrógeno son elementos, lo mismo que el aluminio, el cobre, plata, oro y mercurio. En efecto, existen poco más de 100 elementos conocidos, 92 de los cuales son naturales y los demás son artificiales, o hechos por el hombre. En los últimos años, se han obtenido varios de estos elementos nuevos y se espera que el hombre los irá produciendo en número aún mayor.

Todo lo que nos rodea está formado de elementos pero ellos mismos no pueden ser producidos por la simple combinación química ni por la separación de otros elementos.

LOS ELEMENTOS NATURALES

Número atómico	Nombre	Símbolo
1	Hidrógeno	H
2	Helio	He
3	Litio	Li
4	Berilio	Be
5	Boro	B
6	Carbono	C
7	Nitrógeno	N
8	Oxígeno	O
9	Flúor	F
10	Neón	Ne
11	Sodio	Na
12	Magnesio	Mg
13	Aluminio	Al
14	Silicio	Si
15	Fósforo	P
16	Azufre	S
17	Cloro	Cl
18	Argón	A
19	Potasio	K
20	Calcio	Ca
21	Escandio	Sc
22	Titanio	Ti
23	Vanadio	V
24	Cromo	Cr
25	Manganeso	Mn
26	Hierro	Fe
27	Cobalto	Co
28	Níquel	Ni
29	Cobre	Cu
30	Cinc	Zn
31	Galio	Ga
32	Germanio	Ge
33	Arsénico	As
34	Selenio	Se
35	Bromo	Br
36	Kriptón	Kr
37	Rubidio	Rb
38	Estroncio	Sr
39	Ytrio	Y
40	Circonio	Zr
41	Niobio (Columbio)	Nb
42	Molibdeno	Mo
43	Tecnecio	Tc
44	Rutenio	Ru
45	Rodio	Rh
46	Paladio	Pd
47	Plata	Ag
48	Cadmio	Cd
49	Indio	In
50	Estaño	Sn
51	Antimonio	Sb
52	Teluro	Te
53	Yodo	I
54	Xenón	Xe
55	Cesio	Cs
56	Bario	Ba
57	Lantano	La
58	Cerio	Ce
59	Praseodimio	Pr
60	Neodimio	Nd
61	Prometio	Pm
62	Samario	Sm
63	Europio	Eu
64	Gadolinio	Gd
65	Terbio	Tb
66	Disprosio	Dy
67	Holmio	Ho
68	Erbio	Er
69	Tulio	Tm
70	Yterbio	Yb
71	Lutecio	Lu
72	Afnio	Hf
73	Tantalo	Ta
74	Tungsteno	W
75	Renio	Re
76	Osmio	Os
77	Iridio	Ir
78	Platino	Pt
79	Oro	Au
80	Mercurio	Hg
81	Talio	Tl
82	Plomo	Pb
83	Bismuto	Bi
84	Polonio	Po
85	Astatino	At
86	Radón	Rn
87	Francio	Fr
88	Radio	Ra
89	Actinio	Ac
90	Torio	Th
91	Protactinio	Pa
92	Uranio	U

LOS ELEMENTOS ARTIFICIALES

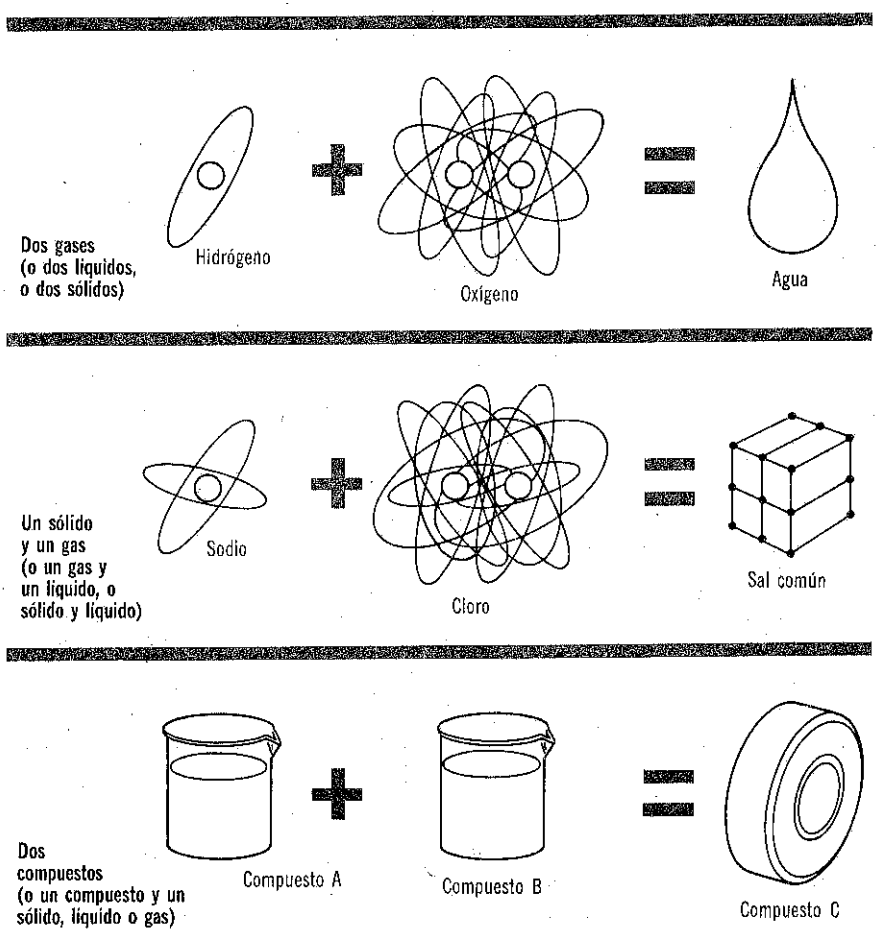
Número atómico	Nombre	Símbolo
93	Neptunio	Np
94	Plutonio	Pu
95	Americio	Am
96	Curio	Cm
97	Berkelio	Bk
98	Californio	Cf
99	Einsteinio	E
100	Fermio	Fm
101	Mendelevio	Mv
102	Nobelio	No
103	Lawrencio	Lw

compuestos

Desde luego, hay mucho más materiales que elementos. Esto se debe a que los elementos pueden combinarse para producir materiales cuyas características son totalmente distintas de las que tienen los elementos constitutivos. El agua, por ejemplo, es un *compuesto* formado por los elementos: hidrógeno y oxígeno; la sal de mesa ordinaria está formada por los elementos sodio y cloro.

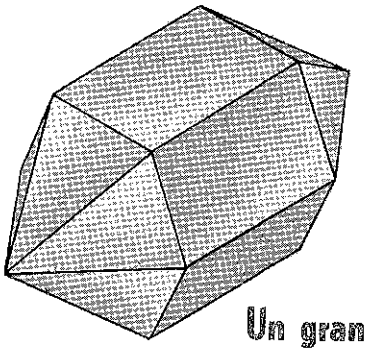
Cabe notar que el hidrógeno y el oxígeno, aunque son gases, pueden producir el agua que es un líquido.

LOS COMPUESTOS SE PUEDEN PRODUCIR COMBINANDO:

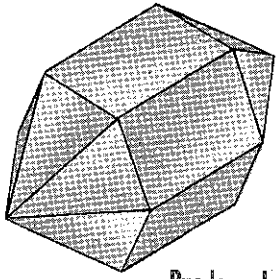


la molécula

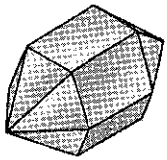
La molécula es la partícula más pequeña a la que puede reducirse un compuesto, antes de que se descomponga en sus elementos. Por ejemplo, si se tomara un gramo de sal de mesa y se le dividiera sucesivamente en dos, hasta obtener el trocito más pequeño posible, seguiría siendo sal y el trocito sería una *molécula* de sal. Si nuevamente se lograra dividirlo en dos, la sal se descompondría en sus elementos.



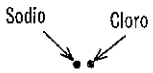
Un grano de sal



Puede reducirse a



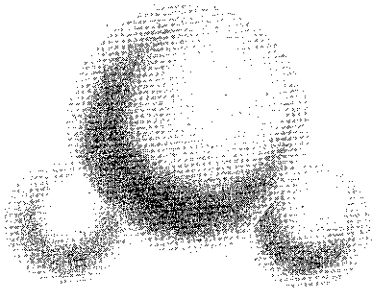
Una molécula de sal



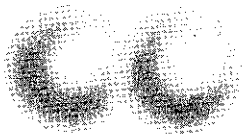
el átomo

El átomo es la partícula más pequeña a la que se puede reducir un *elemento* y que conserva las propiedades de ese elemento. Si una gota de agua se reduce a su tamaño mínimo, se producirá una molécula de agua. Pero si la molécula se redujera aún más, aparecerían *átomos* de hidrógeno y oxígeno.

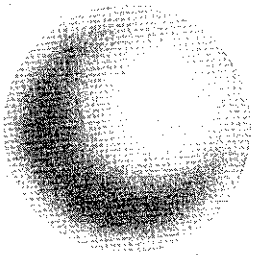
Una molécula de agua



Se convierte en



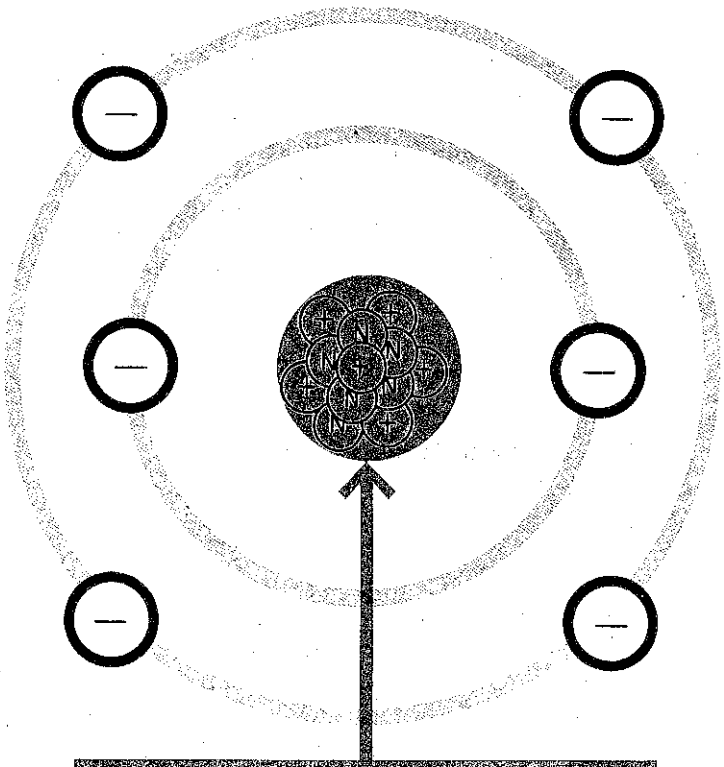
Dos átomos de hidrógeno



Un átomo de oxígeno

Por esto, la fórmula química del agua es H_2O

EL ATOMO DE CARBONO



El núcleo contiene seis protones (+) y seis neutrones. Seis electrones (—) en órbita alrededor del núcleo

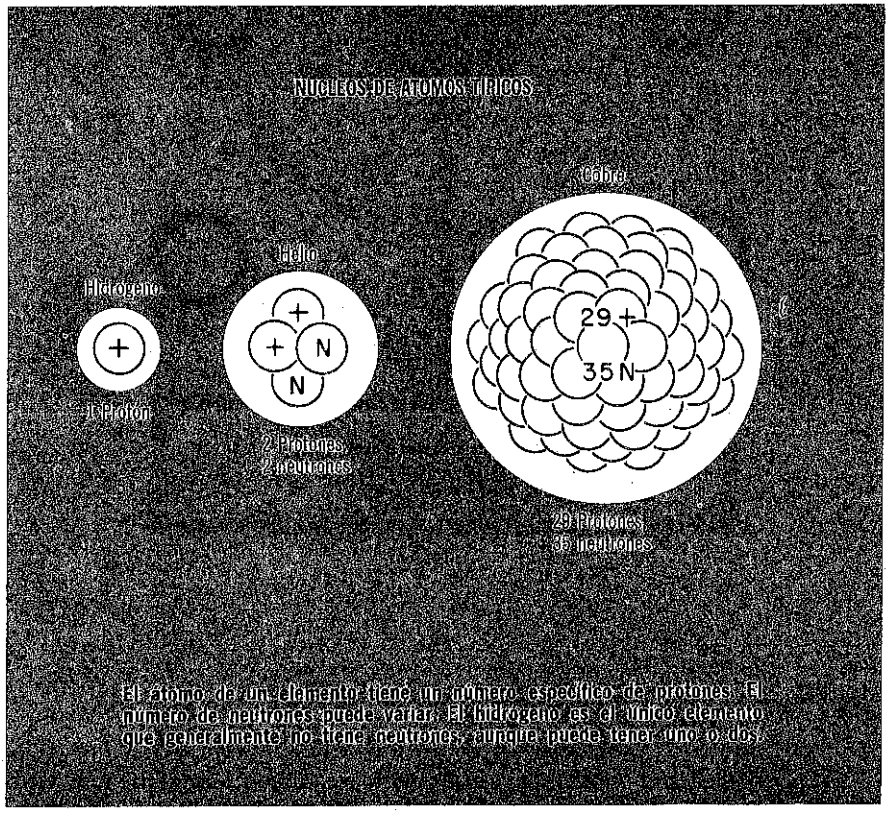
estructura del átomo

Ahora bien, si el átomo de un elemento se divide aún más, este elemento deja de existir entre las partículas que quedan. Estas partículas más pequeñas, que el átomo se encuentran presentes en todos los átomos de los diferentes elementos. El átomo de un elemento difiere del átomo de otro elemento sólo en virtud de que los dos contienen números diferentes de estas partículas subatómicas.

Básicamente, un átomo está formado de tres tipos de partículas subatómicas que son de interés en el estudio de la electricidad: *electrones, protones* y *neutrones*. Los protones y neutrones se localizan en el centro, o *núcleo* del átomo y los electrones giran en *órbitas* alrededor del núcleo.

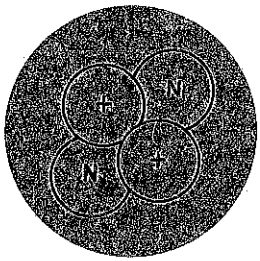
el núcleo

El *núcleo* es la parte central de un átomo. Contiene los *protones* y *neutrones* del átomo. El número de protones en el núcleo determina la forma en que el átomo de un elemento difiere de otro. Por ejemplo, el núcleo de un átomo de hidrógeno contiene un protón, el oxígeno contiene 8, el cobre 29, la plata 47 y el oro 79. De hecho, ésta es la forma en que se identifican los diferentes elementos, es decir, por sus *números atómicos*, como lo muestra la tabla de la página 1-5. El número atómico es el número de protones que contiene cada átomo en su núcleo.

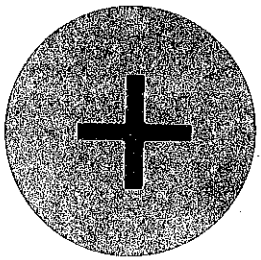


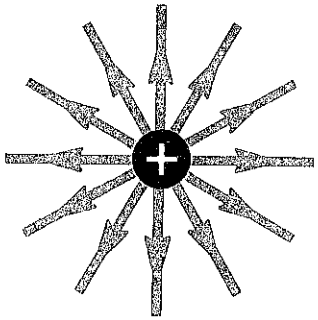
Aunque un neutrón, en realidad, es una partícula en sí, generalmente se la considera como la combinación de un electrón y un protón y es *eléctricamente neutro*. Puesto que los neutrones son eléctricamente neutros, no son muy importantes en el estudio de la naturaleza eléctrica de los átomos.

el protón



Puesto que el núcleo de un átomo contiene neutrones, que son neutros y protones, que son positivos, el núcleo de cualquier átomo es siempre positivo





Las líneas de fuerza positivas de un protón parten radialmente en todas direcciones

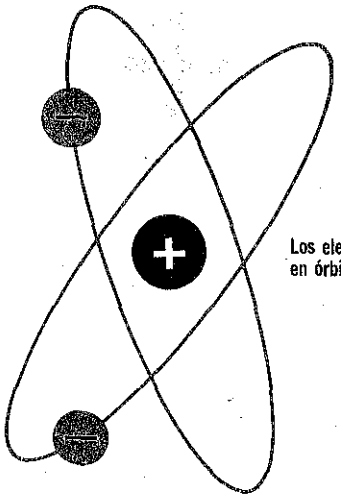
El protón es muy pequeño. Se estima que tiene 1.778 trillonésimas de milímetro de diámetro; el protón mide la tercera parte del diámetro de un electrón, pero tiene casi 1,840 veces la *masa* de un electrón; es decir, el protón es casi 1,840 veces *más pesado* que el electrón. Es muy difícil desalojar el protón del núcleo de un átomo. Por lo tanto, en la teoría eléctrica, se considera que los protones son partes permanentes del núcleo. Los protones no toman parte activa en el flujo o transferencia de energía eléctrica.

El *protón* tiene una *carga* eléctrica *positiva*. Las líneas de fuerza de esta carga irradian desde el protón en toda dirección.

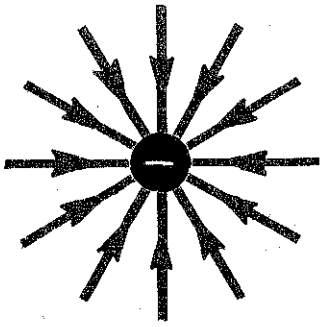
el electrón

Según se ha explicado anteriormente, el electrón tiene un diámetro tres veces mayor que el del protón, o sea, aproximadamente 5.588 trillonésimas de milímetro; pero es 1,840 veces más ligero que el protón. Los electrones son *más fáciles de mover.* Son las partículas que participan activamente en el flujo o transferencia de energía eléctrica.

Los *electrones* giran en órbitas alrededor del núcleo de un átomo y tienen *cargas* eléctricas *negativas.* Las líneas de fuerza de estas cargas vienen desde todas partes, en forma radial, directamente hacia el electrón.



Los electrones, que son negativos, giran en órbitas alrededor del núcleo



Las líneas de fuerza negativas de un electrón llegan radialmente de todas partes.

resumen

☐ La electricidad es producida por partículas diminutas llamadas electrones y protones. ☐ La materia es cualquier cosa que tenga peso y ocupe espacio. Puede tener la forma de un sólido, líquido o gas. ☐ Los materiales básicos que constituyen la materia son los elementos. ☐ Existen 92 elementos naturales; los demás son artificiales. ☐ Los elementos se pueden combinar para formar compuestos, cuyas características son completamente diferentes a las características de los elementos que los forman.

☐ La molécula es la partícula más pequeña a que puede reducirse un compuesto antes de que se descomponga en sus elementos constitutivos. ☐ El átomo es la partícula más pequeña a que puede reducirse un elemento, y que aún conserva las propiedades características de ese elemento. ☐ El átomo de un elemento difiere del átomo de otro elemento sólo en virtud de que contiene números diferentes de partículas subatómicas. ☐ Los tres tipos básicos de partículas subatómicas que son de interés para el estudio de la electricidad son: los electrones, los protones y los neutrones.

☐ El núcleo es la parte central del átomo. ☐ El número de protones en el núcleo determina la forma en que los elementos difieren entre sí. Los diferentes elementos se identifican según su número atómico. El número atómico representa el número de protones en el núcleo. ☐ El protón tiene una carga positiva, es más pequeño pero 1,840 veces más pesado que el electrón, y está en el núcleo del átomo. Es difícil desalojarlo del núcleo. ☐ El electrón tiene una carga negativa y es mayor, pero 1,840 veces más ligero que el protón. Gira alrededor del núcleo en órbitas y es fácil de desalojar. ☐ El neutrón es eléctricamente neutro y se encuentra dentro del núcleo del átomo.

preguntas de repaso

1. ¿Qué partículas producen la electricidad?
2. ¿Cuántos elementos naturales existen?
3. Definir el *número atómico* de un elemento.
4. El protón tiene una carga _____ y el electrón tiene una carga _____.
5. ¿Cuáles son las partículas que se encuentran en el núcleo de un átomo? ¿Cuáles se encuentran en las órbitas?
6. ¿Cuál es la partícula más pequeña que conserva las características del compuesto? ¿Y la del elemento?
7. La sal, ¿es un elemento o un compuesto? ¿El oxígeno? ¿El agua?
8. ¿Cuál de los dos es más pesado y cuántas veces: un protón o un electrón?
9. ¿Cuál tiene un diámetro mayor: un protón o un electrón? Cuántas veces es mayor?
10. ¿Cuál es la carga eléctrica de un neutrón?

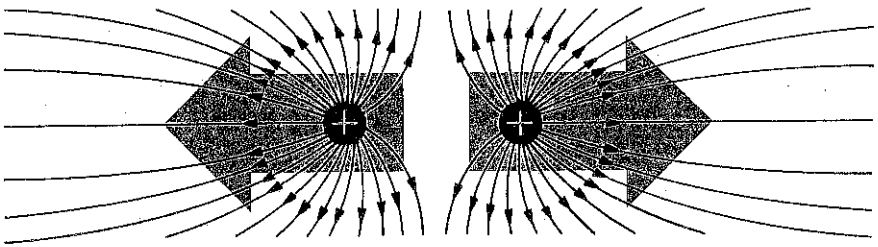
ley de las cargas eléctricas

La carga *negativa* de un electrón es *igual*, pero *opuesta*, a la carga *positiva* de un protón.

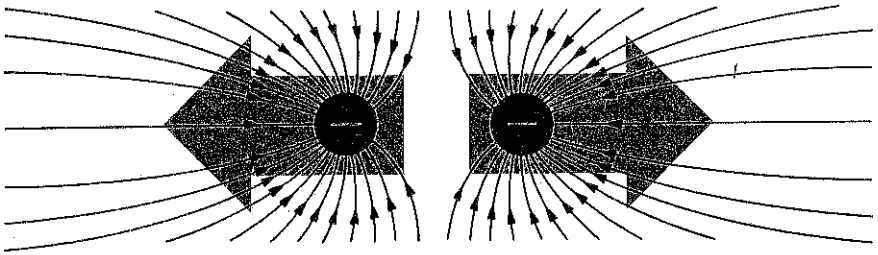
Las cargas de un electrón y un protón se llaman *cargas electrostáticas*. Las líneas de fuerza asociadas con cada partícula producen *campos electrostáticos*. Debido a la forma en que interactúan estos campos, las partículas cargadas pueden atraerse o repelerse entre sí. La ley de las cargas eléctricas dice que las partículas que tienen *cargas del mismo tipo se repelen* y las que tienen *cargas diferentes, se atraen*.

Un protón (+) *repele a otro protón* (+).
Un electrón (−) *repele a otro electrón* (−).
Un protón (+) *atrae a un electrón* (−).

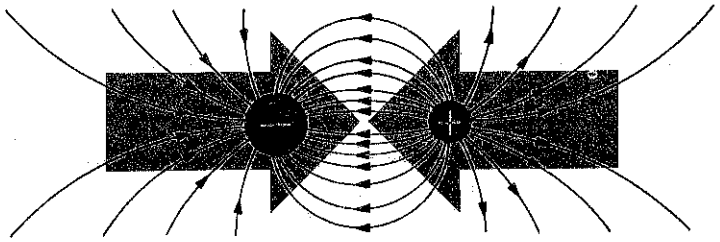
Debido a que los protones son relativamente pesados, tiene poco efecto la fuerza de repulsión que ejercen entre sí dentro del núcleo de un átomo.



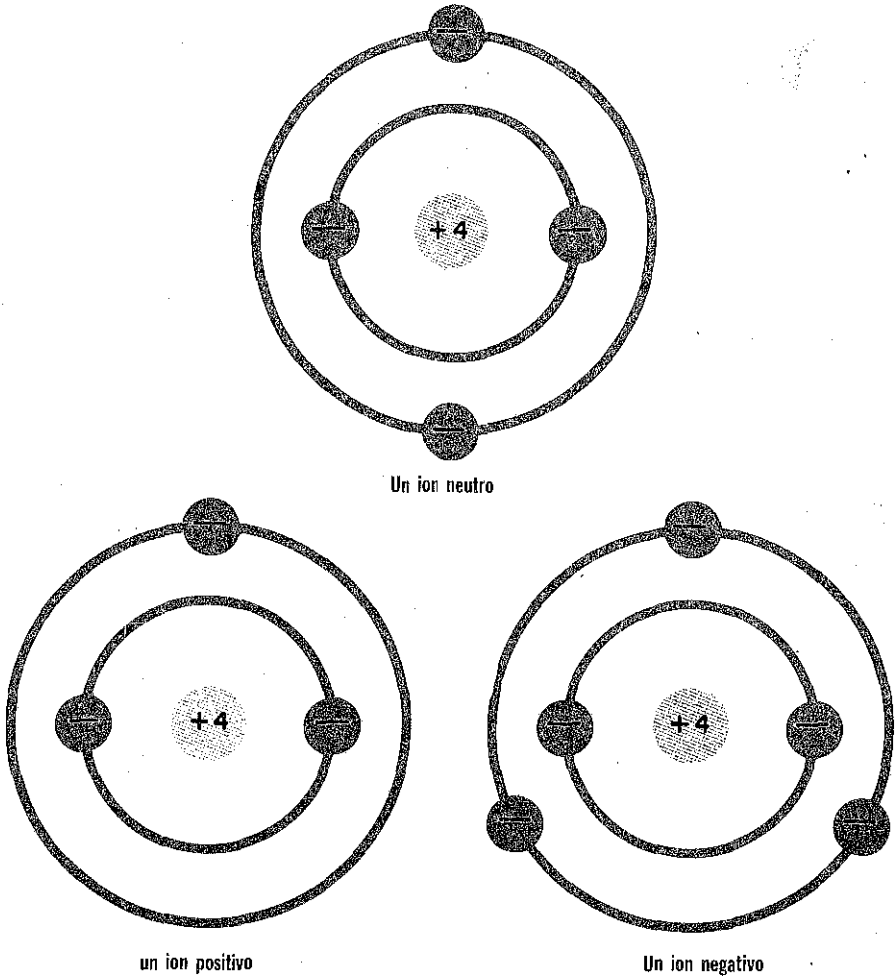
Los protones se repelen



Los electrones se repelen



Los electrones y los protones se atraen

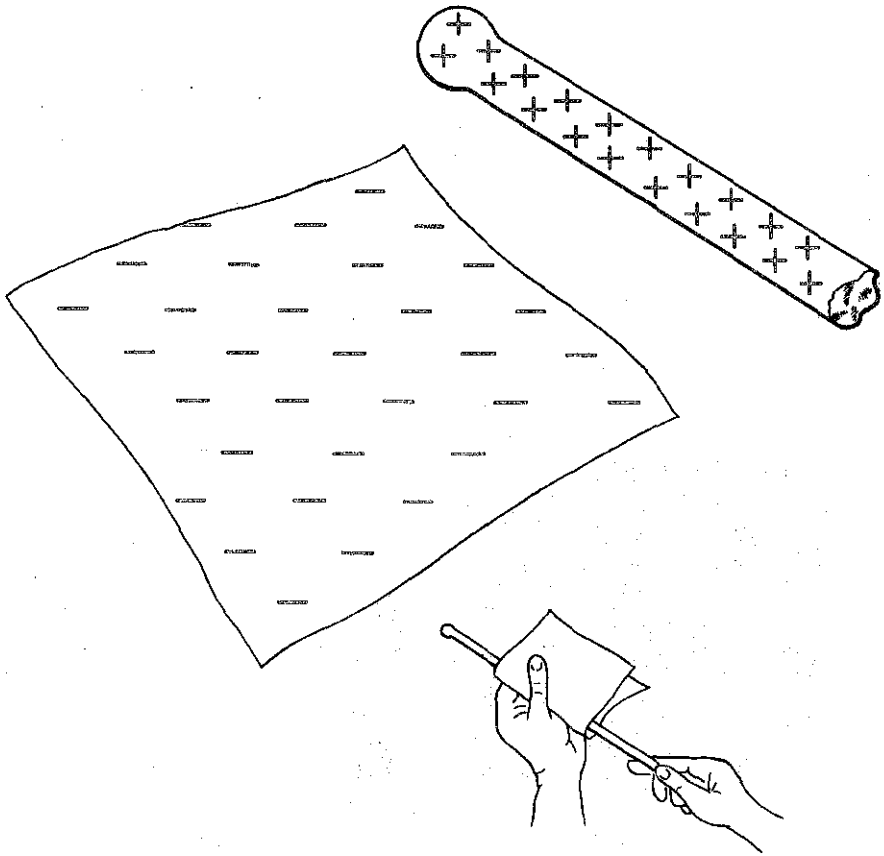


cargas atómicas

Normalmente, un átomo contiene el mismo número de electrones y protones, de manera que las cargas *iguales* y *opuestas*, es decir las negativas y postivas, se equilibran entre sí y hacen que el átomo sea eléctricamente *neutro*. Ahora bien, según ya se explicó, lo que le da al átomo de un elemento sus propiedades características, es el número de los protones que tiene en el núcleo; pero el número de electrones puede variar.

Si un átomo contiene *menos electrones* que protones, tendrá una *carga positiva*. Si tiene *más electrones* que protones tendrá una *carga negativa*. Los átomos cargados reciben el nombre de *iones*.

Después de frotar una varilla de vidrio con seda, ambos materiales se cargan con electricidad

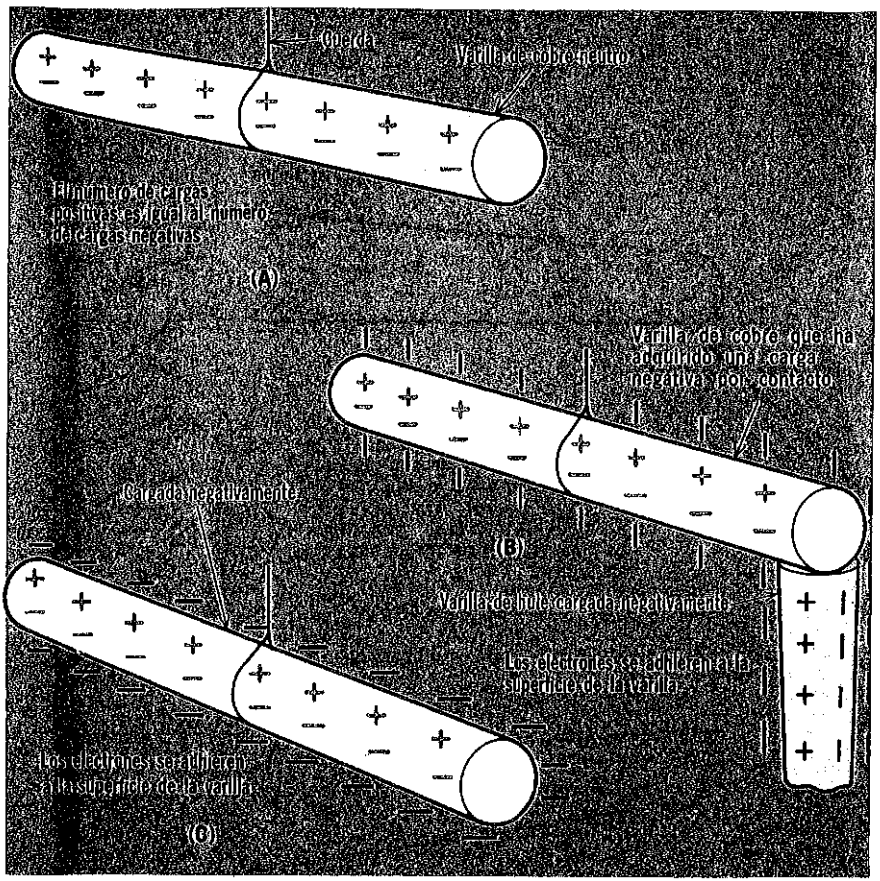


materiales eléctricamente cargados

Cuando en un trozo de material eléctricamente neutro muchos átomos pierden o ganan electrones, el material quedará cargado. Hay muchas maneras de producir estos cambios en los átomos, según se explicará más adelante. El método que descubrieron los antiguos griegos fue el de la *fricción*. Por ejemplo, si se frota una varilla de vidrio con un trozo de seda, la varilla de vidrio le donará algunos electrones a la seda. La varilla de vidrio se cargará positivamente y la seda quedará cargada negativamente.

carga por contacto

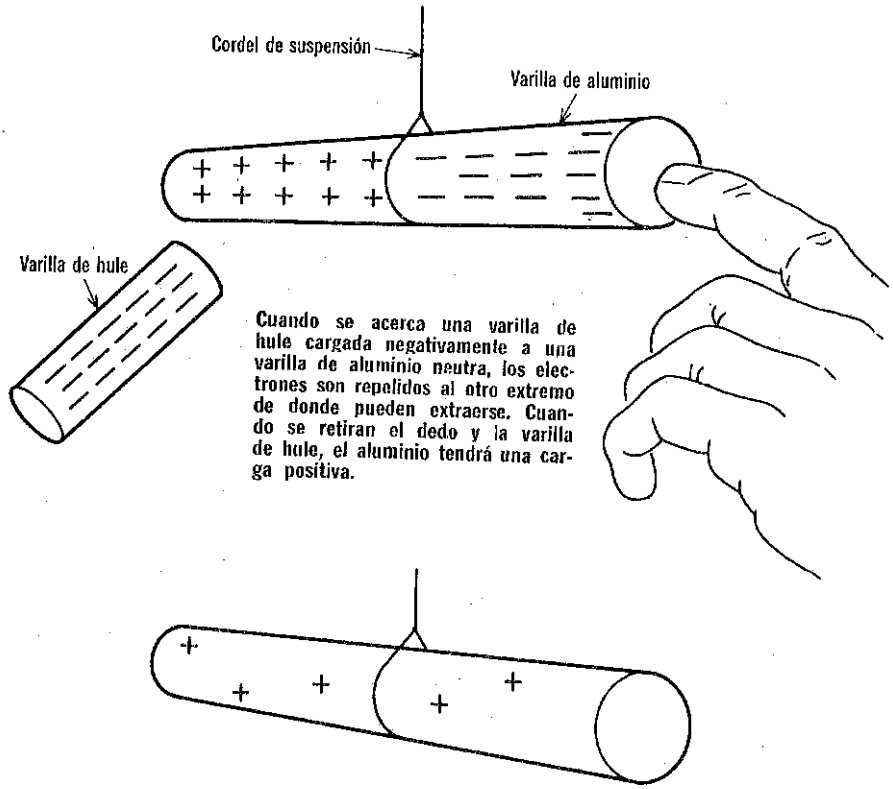
Se puede cargar negativamente una varilla de caucho frotándola con piel. Mediante esta varilla de caucho cargada, ahora se pueden *cargar* otros materiales, por ejemplo cobre, con sólo *tocarlos*. Este método recibe el nombre de carga por contacto, y se basa en el hecho de que la carga negativa de la varilla tiende a *repeler electrones* de la superficie de la varilla.



Los electrones en la superficie de la varilla de caucho pasarán a la superficie de la varilla de cobre *suspendida* para darle una carga negativa. Si en lugar de una varilla de caucho negativa se usa una varilla de vidrio positiva, los electrones de la superficie de la varilla de cobre al ser atraídos le darán una carga positiva.

carga por inducción

Debido a que los electrones y los protones tienen fuerzas de *atracción* y *repulsión*, un objeto se puede cargar sin que lo toque el cuerpo cargado, por ejemplo, si la varilla de caucho cargada negativamente se *acerca* a una pieza de aluminio, la fuerza *negativa* de la varilla de caucho *repelerá* a los *electrones* de la varilla del aluminio hacia el otro extremo. Un extremo de la varilla será entonces negativo y el otro positivo. Cuando se aleja la varilla de caucho, los electrones en la varilla de aluminio se redistribuirán para neutralizar la carga de la varilla. Si se desea que el aluminio permanezca cargado, hay que acercar nuevamente la varilla de caucho y luego tocar con el dedo el extremo negativo. Entonces, los

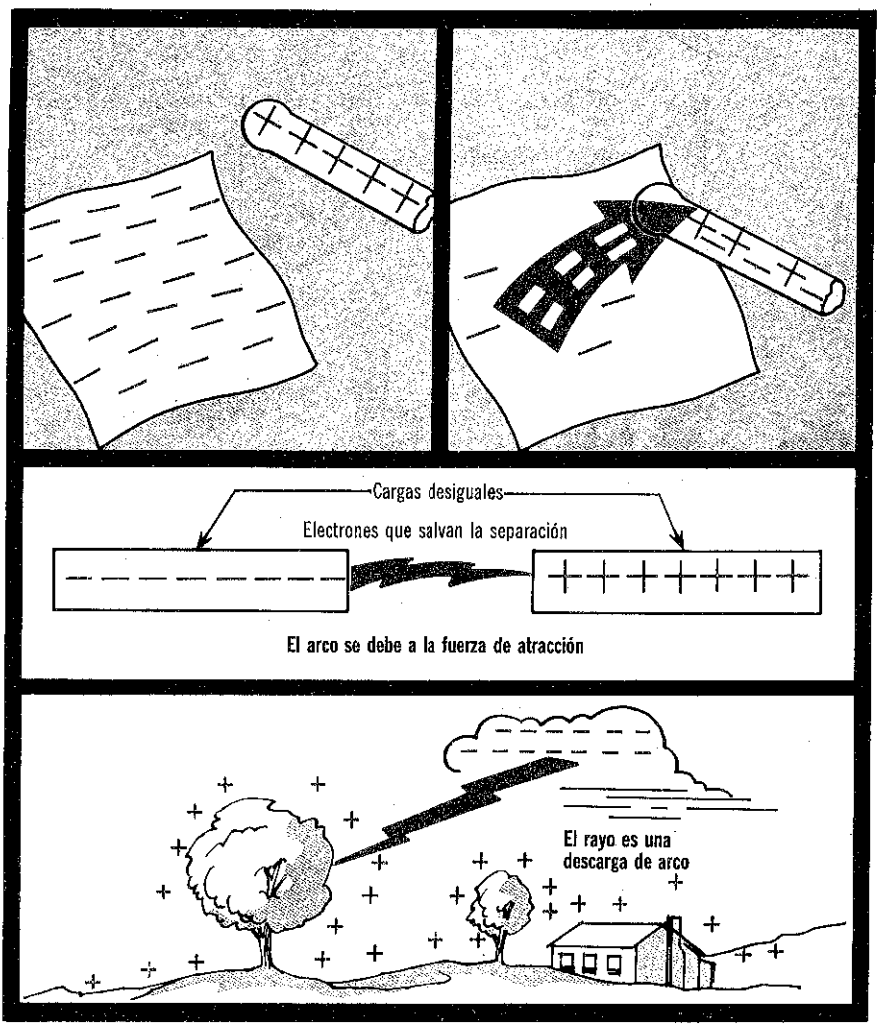


Cuando se acerca una varilla de hule cargada negativamente a una varilla de aluminio neutra, los electrones son repelidos al otro extremo de donde pueden extraerse. Cuando se retiran el dedo y la varilla de hule, el aluminio tendrá una carga positiva.

electrones saldrán de la varilla a través del cuerpo del operario. (Las cargas son sumamente pequeñas, de manera que no se siente nada.) Después, si se retira el dedo antes de alejar la varilla de caucho, la varilla de aluminio permanecerá cargada. Este método se llama el de *carga por inducción*.

neutralización de una carga

Después de frotar el vidrio con la seda, ambos se cargan con electricidad. Pero, si la varilla de vidrio y la seda se juntan nuevamente entonces por la atracción de los iones positivos en la varilla los electrones salen de la seda, hasta que ambos materiales queden de nuevo eléctricamente neutros.

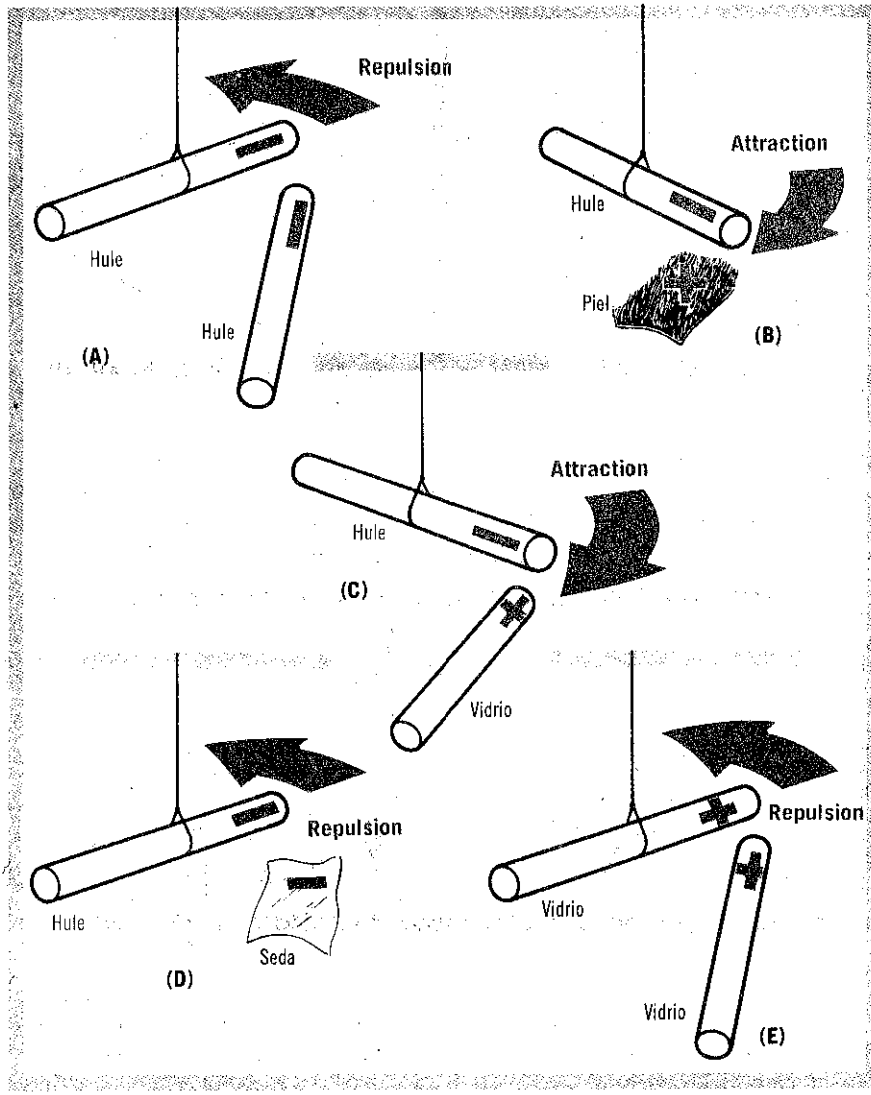


Los cuerpos cargados también pueden conectarse con un alambre para *descargarlos*. Pero, si las cargas en ambos materiales son suficientemente grandes, pueden descargarse a través de un arco, como sucede en el caso del rayo.

atracción y repulsión

Suponga que se tienen dos varillas: una de vidrio que está cargada positivamente, después de frotarla con seda, y una varilla de caucho que se frotó con piel para darle carga negativa. A continuación, se experimenta con el vidrio, caucho, seda y piel, pero sin que se toquen, y se observará que:

Cargas similares se repelen.
Cargas diferentes se atraen.



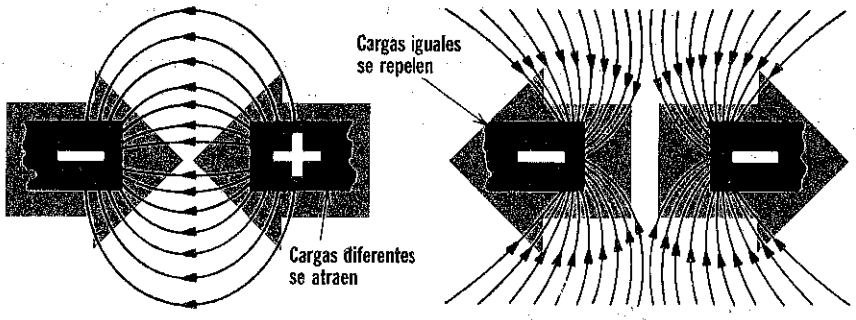
campos electrostáticos

Las fuerzas de atracción y repulsión entre los cuerpos cargados se deben a las *líneas de fuerza electrostática* que existen alrededor de los mismos.

En un objeto *cargado negativamente*, las líneas de fuerza de los electrones que hay en exceso, se suman para producir un campo electrostático, el cual consta de líneas de fuerza que llegan al objeto desde todas direcciones.

En un objeto *cargado positivamente* faltan electrones y esto ocasiona que las líneas de fuerza de los protones que quedaron en exceso, se sumen para producir un campo electrostático cuyas líneas de fuerza *salen* del objeto, hacia todas direcciones.

Estos campos electrostáticos pueden *ayudarse* o bien *oponerse* para *atraer* o *repeler*.



La intensidad de la fuerza de atracción o repulsión depende de dos factores: 1) la cantidad de *carga* que está en cada objeto, y 2) la distancia entre los objetos. Cuanto mayores sean las cargas eléctricas en los objetos, mayor será la fuerza electrostática. Y cuanto más próximos estén entre sí los objetos cargados, mayor será la fuerza electrostática. La fuerza de atracción o repulsión se debilita si disminuye alguna de las cargas o bien los objetos se alejan uno del otro.

Durante el siglo XVIII, un hombre de ciencia llamado Coulomb experimentó con cargas electrostáticas, gracias a lo cual pudo formular la ley de atracción electrostática, que se conoce comúnmente como *Ley de las cargas electrostáticas de Coulomb*. La ley postula que la fuerza de atracción o repulsión electrostática es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Por supuesto, mientras más electrones en exceso tenga un objeto cargado, mayor será su carga negativa; y mientras más electrones le falten, mayor será su carga positiva. Esto se explica más adelante en la página 1-56.

resumen

☐ La carga electrostática negativa de un electrón es igual y opuesta a la carga positiva de un protón. ☐ Los campos electrostáticos se producen debido a las líneas de fuerza asociadas con las cargas. ☐ Cargas iguales se repelen. Un protón (+) repele a otro protón (+). Un electrón (−) repele a otro electrón (−). ☐ Las cargas diferentes se atraen. Un protón (+) atrae a un electrón (−).

☐ Un átomo es neutro si contiene el mismo número de protones y electrones. ☐ Si un átomo contiene menos electrones que protones, tiene carga positiva. ☐ Si un átomo contiene más electrones que protones, tiene carga negativa. ☐ Los átomos que tienen carga positiva o bien negativa, reciben el nombre de iones. ☐ Los objetos se pueden cargar por fricción, contacto o inducción. ☐ La neutralización de un objeto cargado se puede efectuar poniéndolo en contacto con un objeto de carga opuesta.

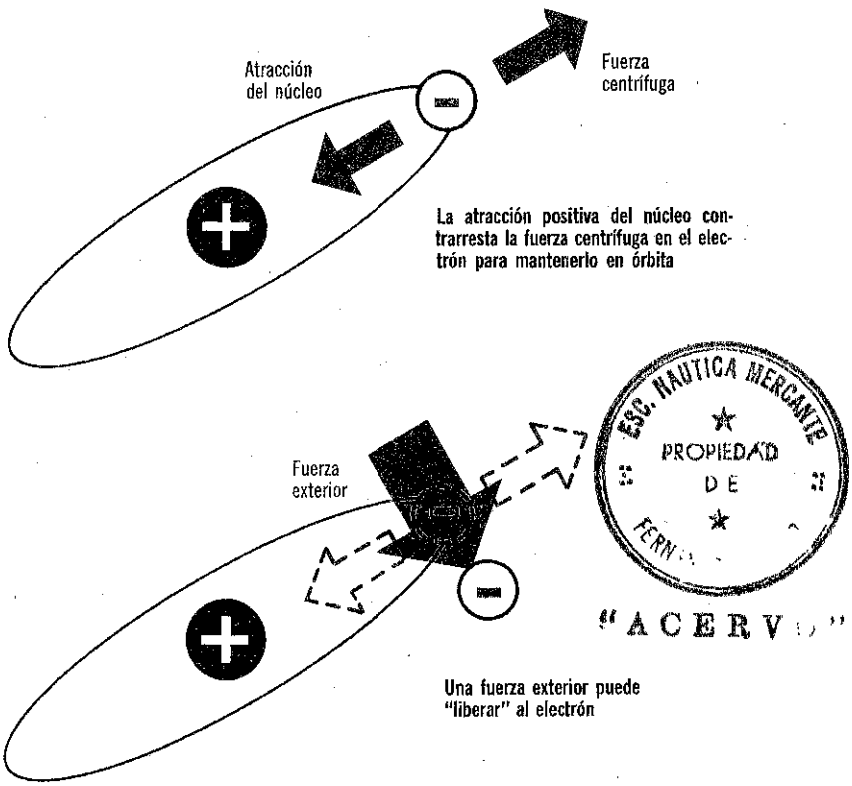
☐ Por convención, las líneas de fuerza entran a un objeto cargado positivamente. ☐ Por convención, las líneas de fuerza salen de un objeto cargado negativamente. ☐ Los campos electrostáticos creados por las líneas de fuerza se suman o se oponen mutuamente, por lo que existe la atracción o bien la repulsión. ☐ La intensidad de la fuerza de atracción o repulsión depende de la cantidad de carga en cada objeto y de la distancia entre los objetos. ☐ La ley de las cargas electrostáticas de Coulomb relaciona las fuerzas de atracción y repulsión: la fuerza es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

preguntas de repaso

1. Si un electrón se aproxima a un protón ¿repelería o atraería el protón al electrón?
2. ¿Por qué no se repelen mutuamente los protones de un núcleo con la fuerza suficiente como para desintegrarlo?
3. ¿Se repelen uno al otro los protones que están en un núcleo?
4. ¿Cuál es la polaridad de la carga de un objeto que tiene menos electrones que protones?
5. ¿Cuáles son los tres métodos usados para cargar un material?
6. Si una varilla de caucho se frota con un pedazo de piel, ¿qué polaridad tiene el caucho?, ¿cuál es la polaridad de la piel?
7. ¿Cómo se puede neutralizar un objeto cargado?
8. ¿Entran a un electrón las líneas de fuerza o salen de él?
9. ¿Aumenta o disminuye según la distancia la fuerza de repulsión que hay entre dos electrones. Si se duplica la distancia, ¿cuál es la magnitud de la nueva fuerza en comparación con la anterior?
10. Enunciar la Ley de Coulomb.

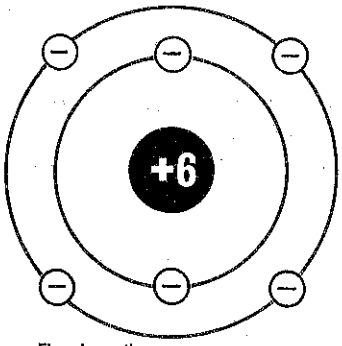
órbitas electrónicas

Según se ha visto, la electricidad se produce cuando los electrones salen de sus átomos. Para entender los distintos métodos usados para lograrlo, se necesita saber algo más acerca de la naturaleza de las diferentes *órbitas electrónicas* que rodean el núcleo de un átomo.

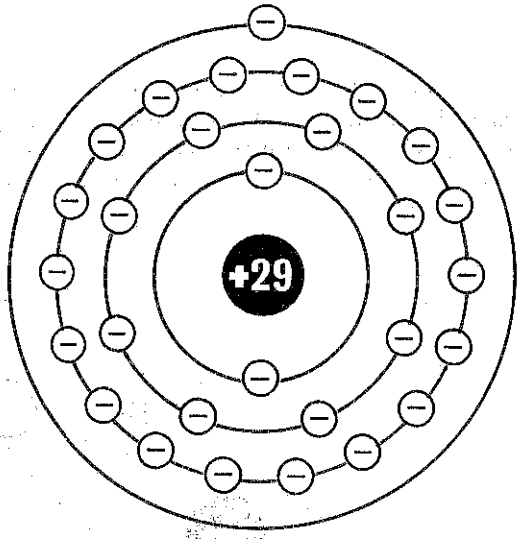


ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
"ACERV

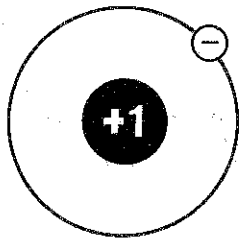
Los electrones *giran* en sus órbitas a gran velocidad alrededor del núcleo del átomo. Debido a la gran velocidad del electrón, la fuerza centrífuga tiende a sacar al electrón de su órbita. Para otra parte, la *atracción positiva* del *núcleo* impide que se escape el electrón. Sin embargo, si se aplica suficiente fuerza externa para ayudar a la fuerza centrífuga, puede "liberarse" el electrón.



El carbono tiene dos capas

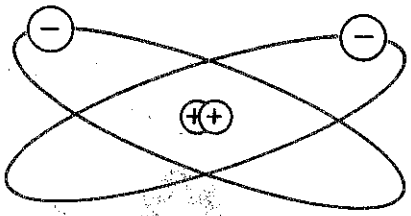


El cobre tiene cuatro capas



El hidrógeno tiene una capa

Esta figura muestra que los electrones que están en la misma órbita, no siguen exactamente la misma trayectoria orbital. Sin embargo, se mantienen a la misma distancia del núcleo, de manera que se encuentran en la misma capa.



capas orbitales

Los electrones que giran cerca del núcleo son difíciles de liberar debido a su proximidad a la fuerza positiva que los sujeta. Cuanto más lejos se encuentren los electrones del núcleo, más débil será la fuerza positiva. Como ya lo habrá notado el lector, en algunos diagramas anteriores, mientras más electrones tiene un átomo, mayor será el número de sus órbitas. Las trayectorias orbitales comúnmente se llaman *capas*.

Los átomos de todos los elementos conocidos pueden tener hasta siete capas. La tabla de la página 1-25 contiene 103 elementos, indicando el número de electrones en cada capa, para cada átomo.

los elementos y sus capas atómicas

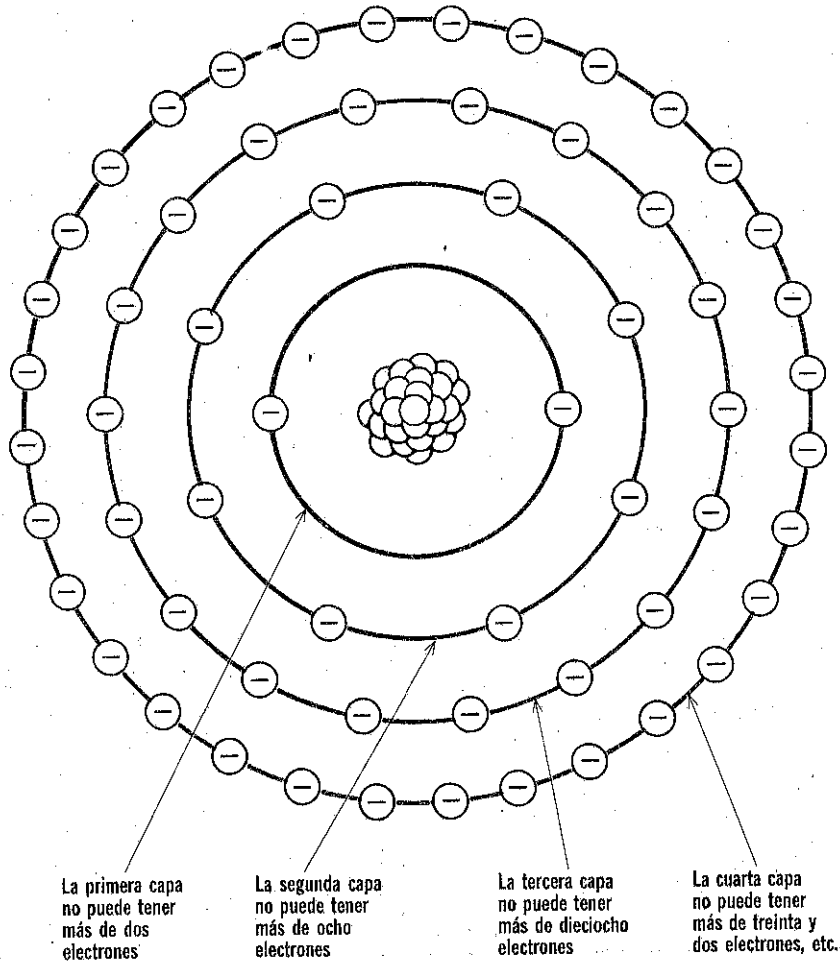
CAPAS ELECTRÓNICAS

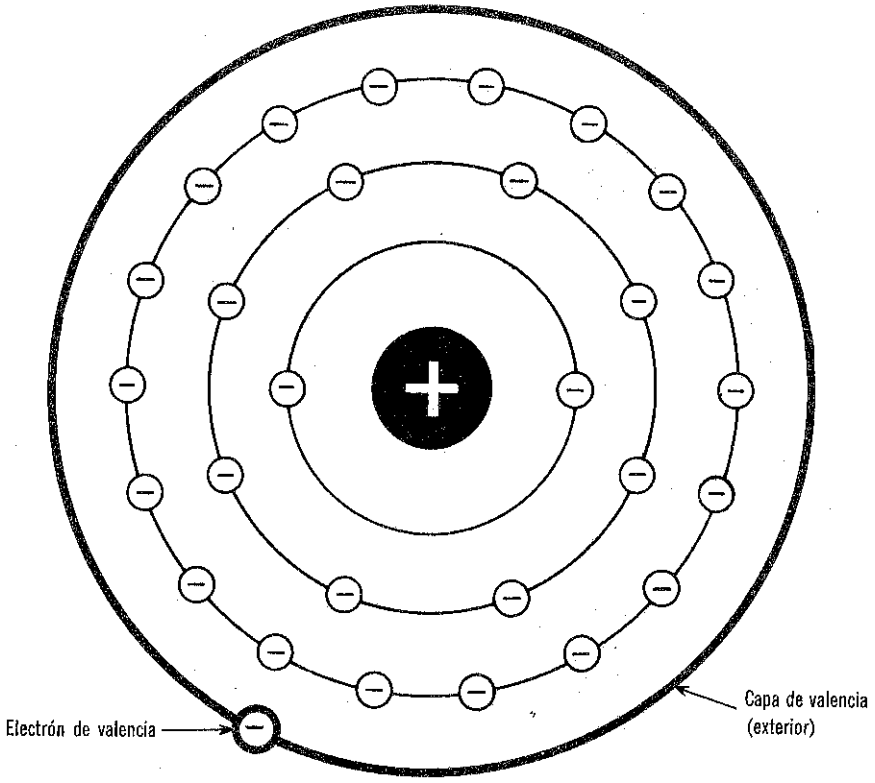
Número atómico	Elemento	Electrones por capa 1	2	3	4	5	6	7	Número atómico	Elemento	Electrones por capa 1	2	3	4	5	6	7
1	Hidrógeno, H	1							53	Yodo, I	2	8	18	18	7		
2	Helio, He	2							54	Xenón, Xe	2	8	18	18	8		
3	Litio, Li	2	1						55	Cesio, Cs	2	8	18	18	8	1	
4	Berilio, Be	2	2						56	Bario, Ba	2	8	18	18	8	2	
5	Boro, B	2	3						57	Lantano, La	2	8	18	18	9	2	
6	Carbono, C	2	4						58	Cerio, Ce	2	8	18	19	9	2	
7	Nitrógeno, N	2	5						59	Praseodimio, Pr	2	8	18	20	9	2	
8	Oxígeno, O	2	6						60	Neodimio, Nd	2	8	18	21	9	2	
9	Flúor, F	2	7						61	Prometio, Pm	2	8	18	22	9	2	
10	Neón, Ne	2	8						62	Samario, Sm	2	8	18	23	9	2	
11	Sodio, Na	2	8	1					63	Europio, Eu	2	8	18	24	9	2	
12	Magnesio, Mg	2	8	2					64	Gadolinio, Gd	2	8	18	25	9	2	
13	Aluminio, Al	2	8	3					65	Terbio, Tb	2	8	18	26	9	2	
14	Silicio, Si	2	8	4					66	Disprosio, Dy	2	8	18	27	9	2	
15	Fósforo, P	2	8	5					67	Holmio, Ho	2	8	18	28	9	2	
16	Azufre, S	2	8	6					68	Erbio, Er	2	8	18	29	9	2	
17	Cloro, Cl	2	8	7					69	Tulio, Tm	2	8	18	30	9	2	
18	Argón, A	2	8	8					70	Yterbio, Yb	2	8	18	32	8	2	
19	Potasio, K	2	8	8	1				71	Lutecio, Lu	2	8	18	32	9	2	
20	Calcio, Ca	2	8	8	2				72	Hafnio, Hf	2	8	18	32	10	2	
21	Escandio, Sc	2	8	9	2				73	Tantalio, Ta	2	8	18	32	11	2	
22	Titanio, Ti	2	8	10	2				74	Tungsteno, W	2	8	18	32	12	2	
23	Vanadio, V	2	8	11	2				75	Renio, Re	2	8	18	32	13	2	
24	Cromo, Cr	2	8	13	1				76	Osmio, Os	2	8	18	32	14	2	
25	Manganeso, Mn	2	8	13	2				77	Iridio, Ir	2	8	18	32	15	2	
26	Hierro, Fe	2	8	14	2				78	Platino, Pt	2	8	18	32	16	2	
27	Cobalto, Co	2	8	15	2				79	Oro, Au	2	8	18	32	18	1	
28	Níquel, Ni	2	8	16	2				80	Mercurio, Hg	2	8	18	32	18	2	
29	Cobre, Cu	2	8	18	1				81	Talio, Tl	2	8	18	32	18	3	
30	Cinc, Zn	2	8	18	2				82	Plomo, Pb	2	8	18	32	18	4	
31	Galio, Ga	2	8	18	3				83	Bismuto, Bi	2	8	18	32	18	5	
32	Germanio, Ge	2	8	18	4				84	Polonio, Po	2	8	18	32	18	6	
33	Arsénico, As	2	8	18	5				85	Astatino, At	2	8	18	32	18	7	
34	Selenio, Se	2	8	18	6				86	Radón, Rn	2	8	18	32	18	8	
35	Bromo, Br	2	8	18	7				87	Francio, Fr	2	8	18	32	18	8	1
36	Kripton, Kr	2	8	18	8				88	Radio, Ra	2	8	18	32	18	8	2
37	Rubidio, Rb	2	8	18	8	1			89	Actinio, Ac	2	8	18	32	18	9	2
38	Estroncio, Sr	2	8	18	8	2			90	Torio, Th	2	8	18	32	19	9	2
39	Ytrio, Y	2	8	18	9	2			91	Protactinio, Pa	2	8	18	32	20	9	2
40	Circonio, Zr	2	8	18	10	2			92	Uranio, U	2	8	18	32	21	9	2
41	Niobio, Nb	2	8	18	12	1			93	Neptunio, Np	2	8	18	32	22	9	2
42	Molibdeno, Mo	2	8	18	13	1			94	Plutonio, Pu	2	8	18	32	23	9	2
43	Tecnecio, Tc	2	8	18	14	1			95	Americio, Am	2	8	18	32	24	9	2
44	Rutenio, Ru	2	8	18	15	1			96	Curio, Cm	2	8	18	32	25	9	2
45	Rodio, Rh	2	8	18	16	1			97	Berkelio, Bk	2	8	18	32	26	9	2
46	Paladio, Pd	2	8	18	18	0			98	Californio, Cf	2	8	18	32	27	9	2
47	Plata, Ag	2	8	18	18	1			99	Einsteinio, E	2	8	18	32	28	9	2
48	Cadmio, Cd	2	8	18	18	2			100	Fermio, Fm	2	8	18	32	29	9	2
49	Indio, In	2	8	18	18	3			101	Mendelevio, Mv	2	8	18	32	30	9	2
50	Estaño, Sn	2	8	18	18	4			102	Nobelio, No	2	8	18	32	31	9	2
51	Antimonio, Sb	2	8	18	18	5			103	Lawrencio, Lw	2	8	18	32	32	9	2
52	Teluro, Te	2	8	18	18	6											

capacidad de las capas

Si se estudia brevemente la tabla de la página 1-25, se notará que cada capa únicamente puede alojar cierto número de electrones. La capa más cercana al núcleo (primera capa) no puede contener más de dos electrones; la segunda no más de 8 electrones; la tercera no más de 18; la cuarta, no más de 32; etcétera.

Si nuevamente se observa la tabla de la página 1-25, se verá que hasta el número atómico 10 el número de electrones en la segunda capa va aumentando hasta 8. Puesto que éste es el límite de la segunda banda, tiene que iniciarse una tercera. Desde el número atómico 11 hasta el 18, la tercera capa se forma hasta 8 y luego se inicia una cuarta capa. Luego, para los números del 19 al 29, la tercera capa llega a su máximo de 18.

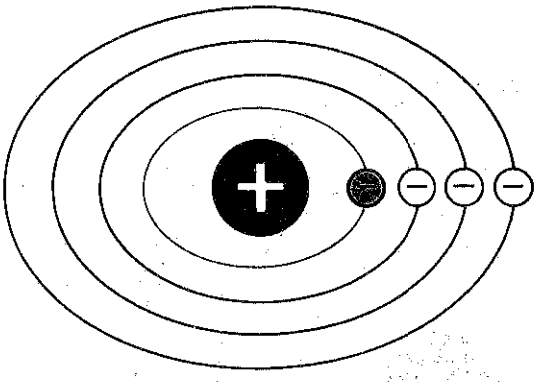




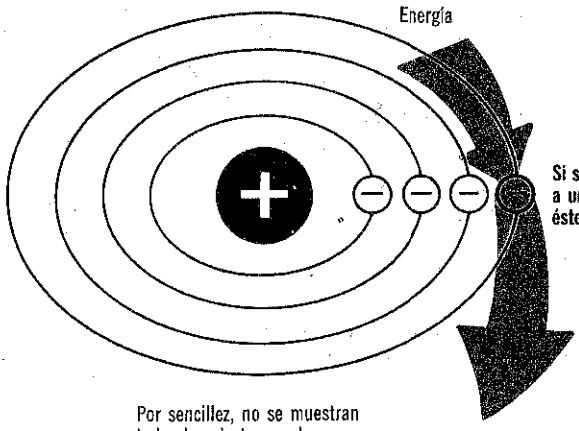
La capa exterior recibe el nombre de capa de valencia y los electrones en esa capa se llaman electrones de valencia

capa exterior de valencia

Según se advierte en la tabla de la página 1-25, la tercera capa puede contener hasta 18 electrones, pero apenas llega a tener 8 electrones cuando se inicia la cuarta capa. Esto también ocurre en la cuarta capa, pues apenas tiene 8 electrones, cuando ya se inicia la quinta capa, a pesar de que la cuarta puede contener hasta 32 electrones. Esto indica que existe alguna otra regla. *La capa exterior de un átomo no tendrá más de 8 electrones.* La capa exterior de un átomo recibe el nombre de *capa de valencia* y sus electrones reciben el nombre de *electrones de valencia.* El número de electrones en la capa de valencia de un átomo es importante en la electricidad, como se verá más tarde.



Los electrones interiores están más estrechamente unidos al núcleo y contienen menos energía que los de las capas exteriores



Si se agrega suficiente energía a un electrón de valencia, éste se fugará del átomo

Por sencillez, no se muestran todos los electrones de capas interiores

energía del electrón

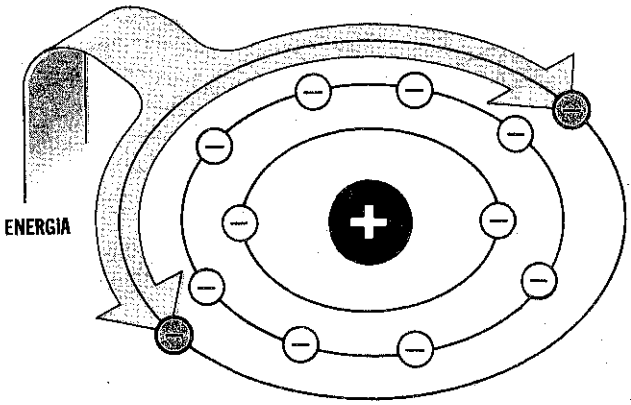
Aunque todo electrón tiene la misma carga negativa, no todos los electrones tienen el mismo *nivel de energía*. Los electrones cuya órbita está próxima al núcleo contienen menos energía que los que se encuentran en órbitas externas. Cuanto más lejanas estén las órbitas electrónicas del núcleo, mayor será su energía.

Si se añade suficiente energía a un electrón, saldrá *fuera de su órbita,* hacia la órbita de orden inmediato superior. Y, si se aplica suficiente energía a un electrón *de valencia,* el electrón *se desligará de su átomo,* ya que no existe una órbita inmediata superior.

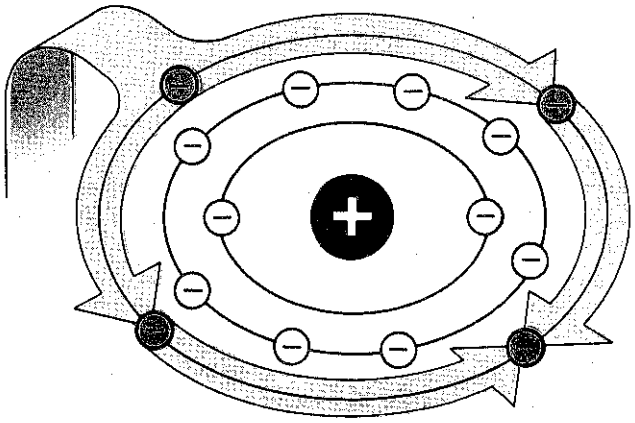
cuándo se produce la electricidad

La electricidad se produce cuando *los electrones se liberan* de sus átomos. Puesto que los electrones de valencia son los más alejados de la fuerza atractiva del núcleo y además tienen el nivel de energía más alto, son los que pueden liberarse más fácilmente. Cuando se aplica suficiente fuerza o energía a un átomo, los electrones de valencia se liberan. Sin embargo, la energía suministrada a una capa de valencia se distribuye entre los electrones en dicha capa. Por lo tanto, para determinada cantidad de energía mientras más electrones de valencia haya, *menor* será la energía que tendrá cada electrón.

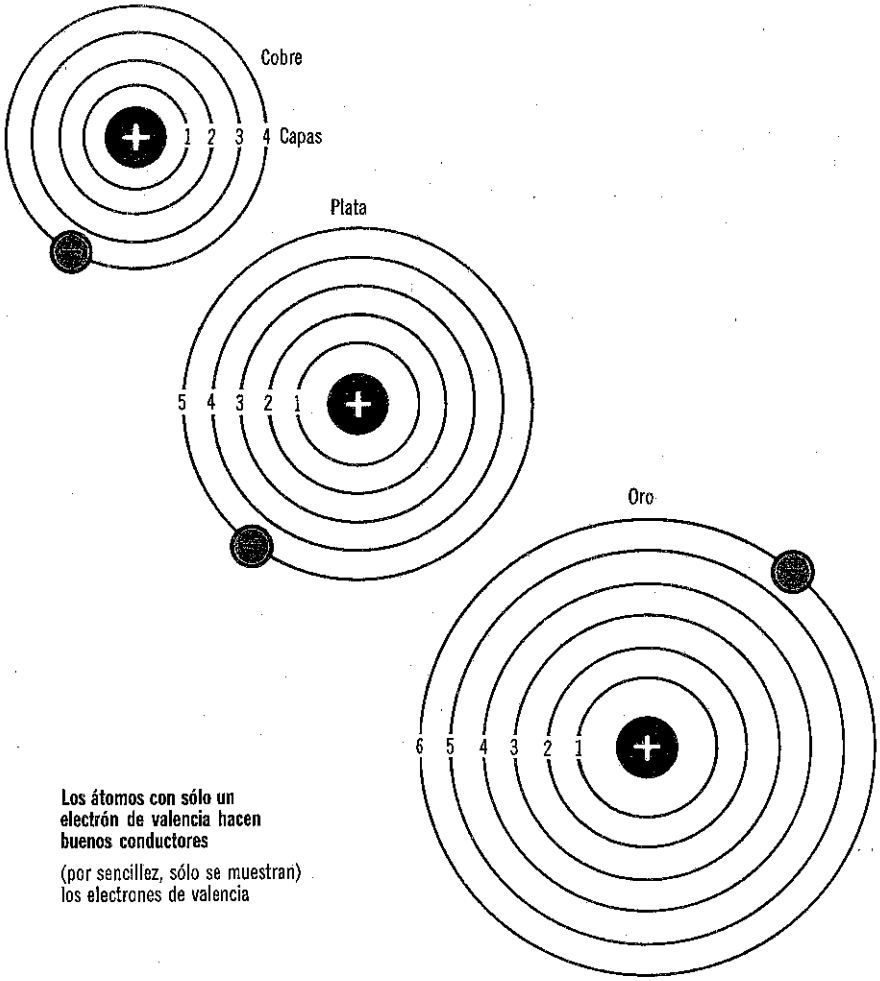
La energía se aplica a la capa de valencia y se distribuye entre los electrones de valencia.



Dos electrones comparten igualmente la energía



Cuatro electrones comparten igualmente la energía, pero cada uno gana menos energía que cualquier electrón del diagrama superior.



Los átomos con sólo un electrón de valencia hacen buenos conductores

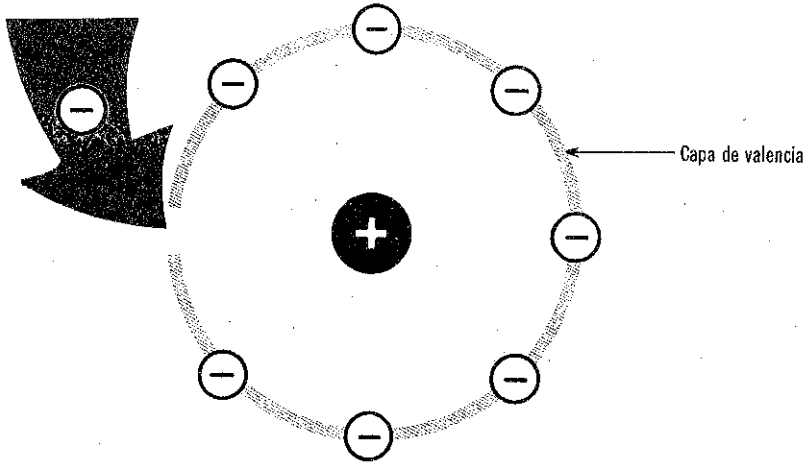
(por sencillez, sólo se muestran) los electrones de valencia

conductores

La capa de valencia puede contener hasta ocho electrones y cualquier energía que se aplique a uno de ellos se reparte entre todos los electrones de valencia. Por lo tanto, los átomos que tienen menos electrones de valencia, les dejarán liberarse más fácilmente. Los materiales cuyos electrones se liberan fácilmente se llaman *conductores.* Los átomos de los conductores tienen sólo 1 ó 2 electrones de valencia. Los que sólo tienen *1 electrón de valencia,* son los mejores conductores eléctricos.

Si se examina la tabla de los elementos en la página 1-25, pueden determinarse los buenos conductores. Todos tienen un electrón en su capa exterior. La mayor parte de los *metales* son buenos conductores. Los más conocidos son: cobre (núm. 29), plata (núm. 47) y oro (núm 79).

Un átomo que está saturado más de la mitad, pero que tiene menos de ocho electrones, trata de estabilizarse llenando su capa de valencia.



Estos átomos forman buenos aisladores debido a que es muy difícil liberar un electrón de su capa de valencia

aislantes

Los aisladores son materiales que no dejan que sus electrones se liberen fácilmente. Los átomos de los aisladores tienen capas de valencia que están llenas con 8 electrones o bien llenas a más de la mitad. Cualquier energía que se aplique uno de estos átomos se distribuirá entre un número de electrones relativamente grande. Además, estos átomos se resisten a desprenderse de sus electrones debido a un fenómeno que se conoce como *estabilidad química*.

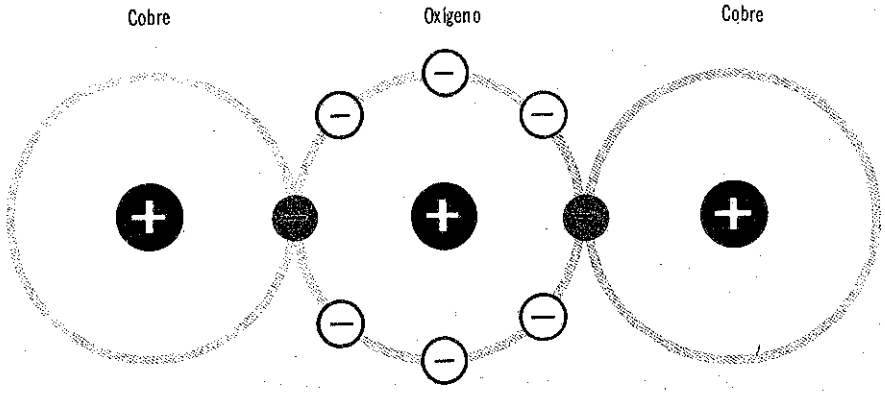
Un átomo es completamente *estable* cuando su *capa exterior* está completamente *saturada* o cuando tiene ocho electrones de valencia. Un átomo estable resiste cualquier tipo de actividad. En efecto, no se combinará con ningún otro átomo para formar compuestos. Existen seis elementos que son naturalmente estables: helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón. A éstos se les conoce como *gases inertes*.

Todos los átomos que tienen menos de 8 electrones de valencia tienden a alcanzar el estado estable. Los que están llenos a menos de la mitad (los conductores), tienden a liberar los electrones para vaciar la capa inestable. Pero los que están llenos a más de la mitad (los aisladores) tienden a recoger electrones para llenar la capa de valencia. Así pues, no solamente es difícil liberar a sus electrones, sino que los átomos de aisladores también se opondrán a la producción de electricidad debido a su tendencia a atrapar a cualesquiera electrones que puedan ser liberados. Los átomos con siete electrones de valencia, son los que tratan más activamente de llenar la capa de valencia y constituyen excelentes aisladores eléctricos.

compuestos como aislantes

La tendencia de los átomos a volverse estables es un factor fundamental para determinar cómo se combinan los átomos de los elementos para formar las moléculas de un compuesto. Los átomos tienden a combinarse de manera que la molécula contenga 8 electrones de valencia. Por ejemplo, considérese el agua: su fórmula es H_2O. Esto significa que, en una molécula de agua hay dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Si se observan los elementos 1 y 8 de la página 1-25, se verá que cada uno de los dos átomos de hidrógeno tiene un electrón de valencia y el átomo de oxígeno tiene 6, lo cual da un total de 8 electrones de valencia. Cada átomo de hidrógeno *comparte* su electrón de valencia con el átomo de oxígeno. Los electrones compartidos unen a los átomos para formar la molécula H_2O. Este tipo de unión se llama *covalente*. El agua pura, por lo tanto, es un buen aislante. En otros compuestos, por ejemplo el cloruro de sodio (NaCl), un átomo entrega un electrón para volverse ion positivo y el otro toma este electrón para convertirse en ion negativo; entonces los dos iones quedan ligados por atracción. Este tipo de unión se conoce como unión *iónica* o *electrovalente*. La molécula completa tiene 8 *electrones* de valencia lo que la hace estable.

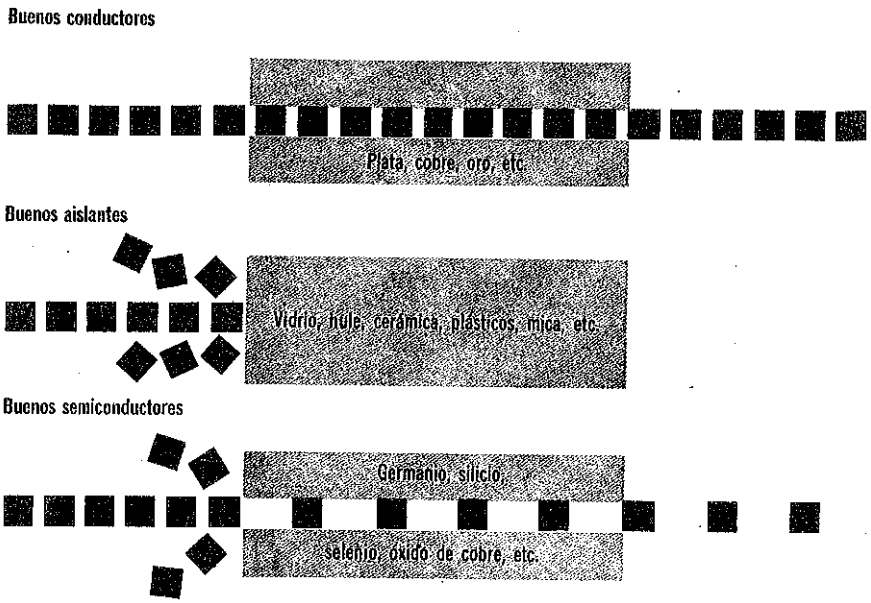
Debido a la tendencia hacia la estabilidad que tienen los átomos, cuando se combinan, la mayor parte de los compuestos, por ejemplo, vidrio, madera, caucho, plástico, mica, etc., constituyen buenos aislantes. Sin embargo, cabe notar que no existe tal cosa como un aislador perfecto. Simplemente es muy difícil liberar electrones de tales materiales.



El cobre es un buen conductor debido a que sólo tiene un electrón de valencia, pero cuando dos átomos de cobre se combinan con un átomo de oxígeno, producen una molécula de óxido de cobre (Cu_2O); ahora, con ocho electrones de valencia, la molécula es estable. Por consiguiente, el óxido de cobre, en su forma pura, es un buen aislante. (Sin embargo, la temperatura puede cambiar esto, según se explica en la página 1-33.)

semiconductores

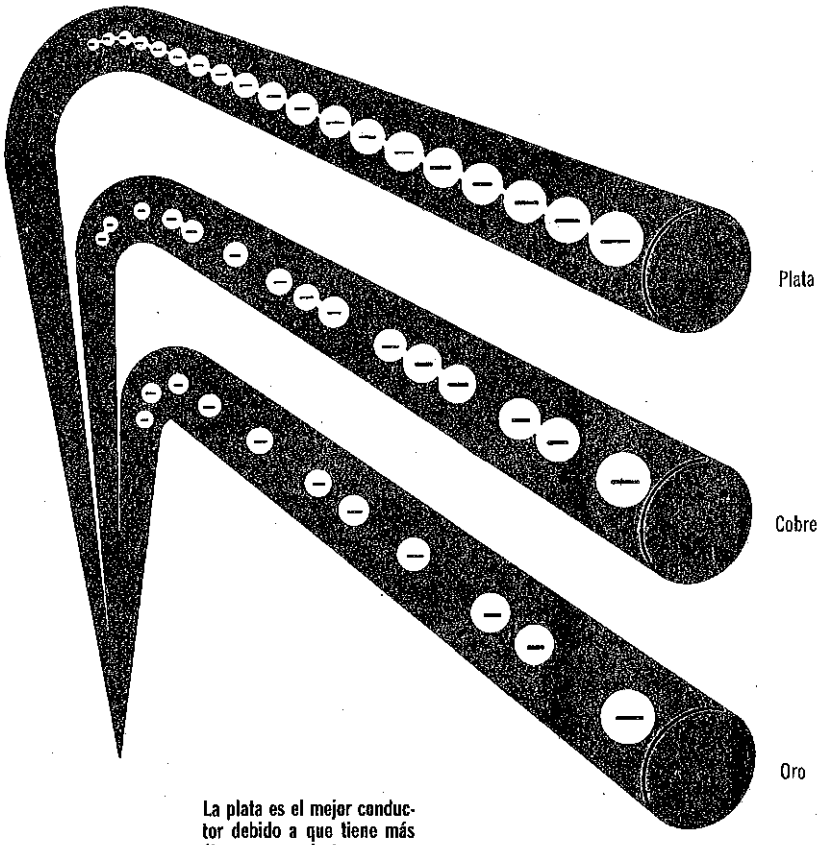
Puesto que los conductores tienen sus capas de valencia llenas a menos de la mitad, y los aisladores tienen las suyas llenas a más de la mitad, las substancias que tienen átomos con cuatro electrones de valencia reciben el nombre de *semiconductores.* Estos conducen mejor que los aisladores, pero no tan bien como los conductores. Algunos ejemplos son: el germanio, el silicio y el selenio. Sin embargo, cuando se combinan los átomos de los semiconductores, comparten sus electrones de tal manera que se llenan las capas de valencia. Por lo tanto, los materiales semiconductores, *puros,* también tienden a ser buenos aisladores. Pero eso sólo ocurre a la temperatura del cero absoluto, porque a temperaturas altas y aun a la temperatura ambiente normal, la energía ocasiona la liberación de numerosos electrones de valencia de manera que el material se comporta como semiconductor.



Por otra parte, muchos compuestos que tienden a ser estables, generalmente contienen *impurezas* que facilitan la conducción eléctrica. Por lo tanto, si el agua y el óxido de cobre contienen impurezas, no son ya aisladores, sino semiconductores. De hecho, el *óxido de cobre* se fabrica con *cantidades controladas de impurezas,* de manera que se pueda usarlo como rectificador semiconductor de circuitos de potencia. Los compuestos que conservan las características de buenos *aisladores,* son los que están menos afectados por la *temperatura* y sólo contienen pequeñas cantidades de impurezas.

comparación de los conductores

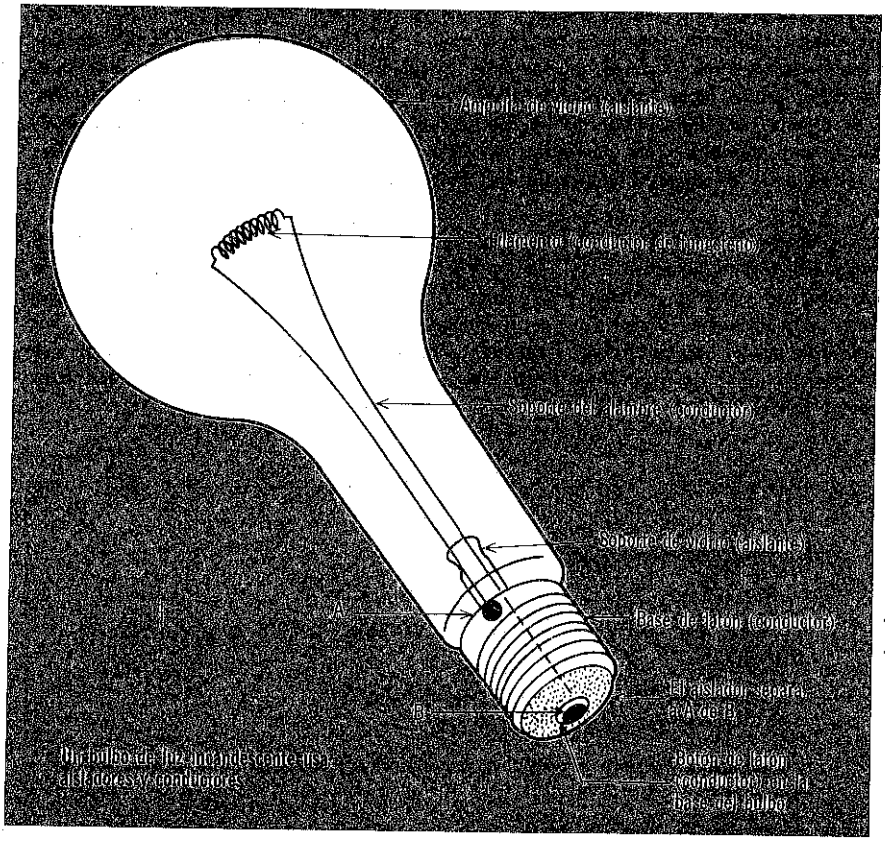
Algunos metales son mejores conductores que otros. Por ejemplo, aun cuando los átomos de cobre, plata y oro tienen, cada uno, un solo electrón de valencia que puede liberarse fácilmente, la *plata* es el mejor conductor. Le sigue el *cobre* y luego el *oro*. Esto se debe al hecho de que en una cantidad dada de material la plata tiene *más átomos* que los demás metales y por consiguiente, se dispone de un mayor número de *electrones libres*.



La plata es el mejor conductor debido a que tiene más átomos con electrones que pueden ser liberados. Pero el cobre se usa con más frecuencia en electricidad debido a que la plata es más costosa

comparación de los conductores, aisladores y semiconductores

Los *conductores* son materiales que tienen electrones cuya liberación es fácil. La mayor parte de los metales que son buenos conductores eléctricos, generalmente se describen como materiales con muchos *electrones "libres"*.



Los aisladores más usados son el vidrio, hule, plástico, madera, cerámica y madera. Es muy *difícil* liberar los electrones en estos materiales. Por ello se dice que contienen *muy pocos* electrones libres.

Los *semiconductores* son materiales con mayor número de electrones libres que los aisladores pero menor que los conductores.

resumen

☐ Los electrones giran a gran velocidad en sus órbitas alrededor del núcleo del átomo. Esta alta velocidad da lugar a una fuerza centrífuga que tiende a sacar de órbita a los electrones. La atracción positiva del núcleo evita esto. Una fuerza exterior grande puede liberar al electrón del átomo. ☐ La fuerza de atracción positiva que ejerce el núcleo sobre los electrones en órbita es mayor mientras más próximos estén al núcleo; por lo tanto, es más difícil que liberen.

☐ Los electrones giran en órbita, en cualquiera de las siete bandas posibles. ☐ La banda interior puede contener un máximo de 2 electrones; la segunda, 8; la tercera, 18; la cuarta, 32; etc. ☐ La banda exterior de un átomo es la banda de valencia. ☐ Todos los electrones en esta banda exterior se llaman electrones de valencia. ☐ La banda de valencia nunca contiene más de 8 electrones. ☐ El átomo con una banda de valencia completamente llena es muy estable y químicamente inactivo. ☐ Los electrones que están en la órbita más alejada del núcleo tienen mayor energía que los demás. Si se agrega suficiente energía a un electrón, éste pasará a la órbita inmediata exterior; si se aplica suficiente energía a un electrón de valencia, éste quedará liberado. ☐ El flujo de electrones libres constituye una corriente eléctrica.

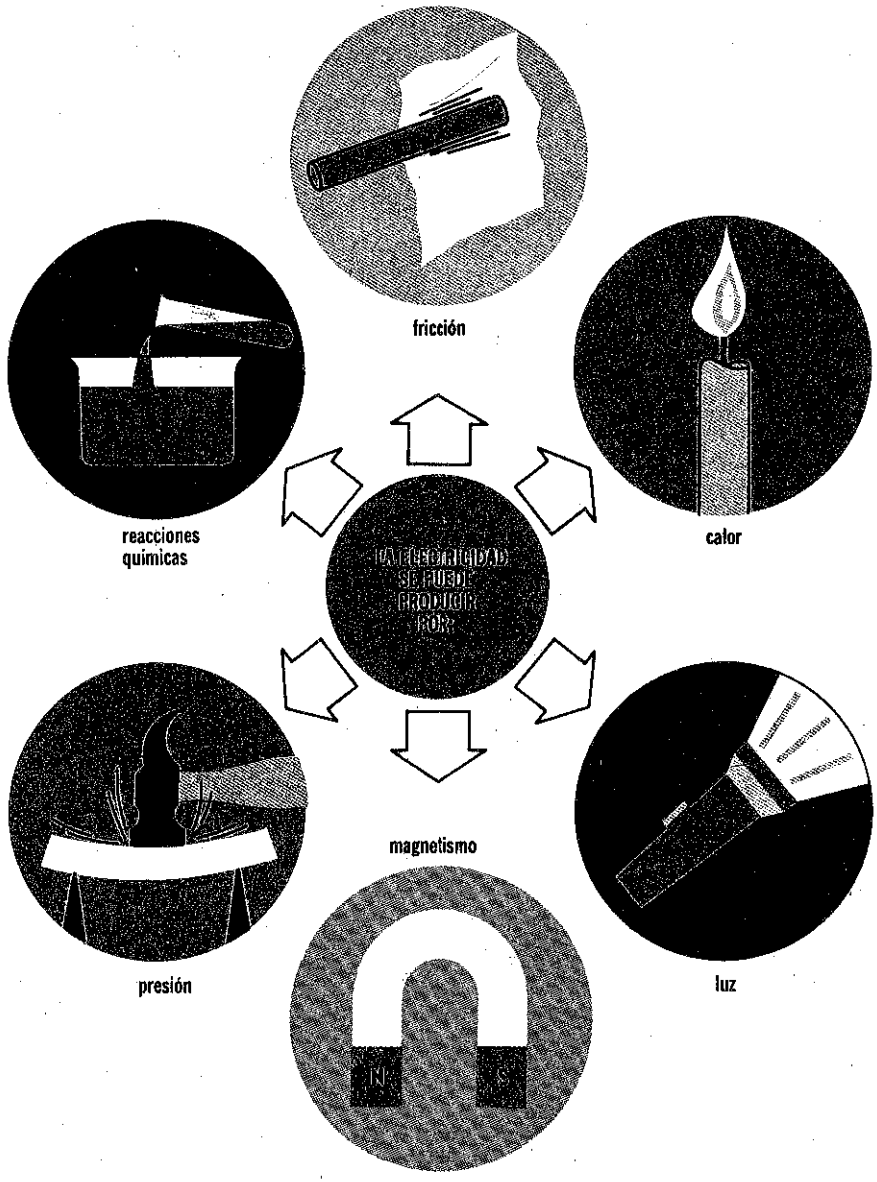
☐ Los conductores son materiales que contienen uno o dos electrones de valencia, los cuales son fáciles de liberar. ☐ Los aisladores son materiales que tienen 5 o más electrones de valencia, difíciles de liberar. ☐ Los semiconductores son materiales que tienen más electrones libres que los aisladores, pero menos que los conductores. Las impurezas pueden convertirlos en mejores conductores. ☐ La unión es la fuerza que mantiene juntos a los elementos para formar compuestos. Los electrones en los compuestos forman octetos estables.

preguntas de repaso

1. ¿Qué fuerza evita que un electrón se libere debido a su fuerza centrífuga?
2. ¿Qué es una banda o capa y cuántas hay?
3. ¿Qué es un electrón de "valencia"?
4. ¿Cuál es el número máximo de electrones de valencia que puede tener un átomo?
5. ¿Qué es un electrón "libre"?
6. ¿Por qué son buenos aisladores los compuestos? Mencione dos buenos aisladores.
7. Mencione dos semiconductores y dos conductores.
8. ¿Cuáles son las características de los semiconductores?
9. ¿Por qué se agregan impurezas a los compuestos?
10. ¿Es buen conductor un elemento que contiene seis electrones de valencia? ¿Lo es un elemento con dos electrones de valencia?

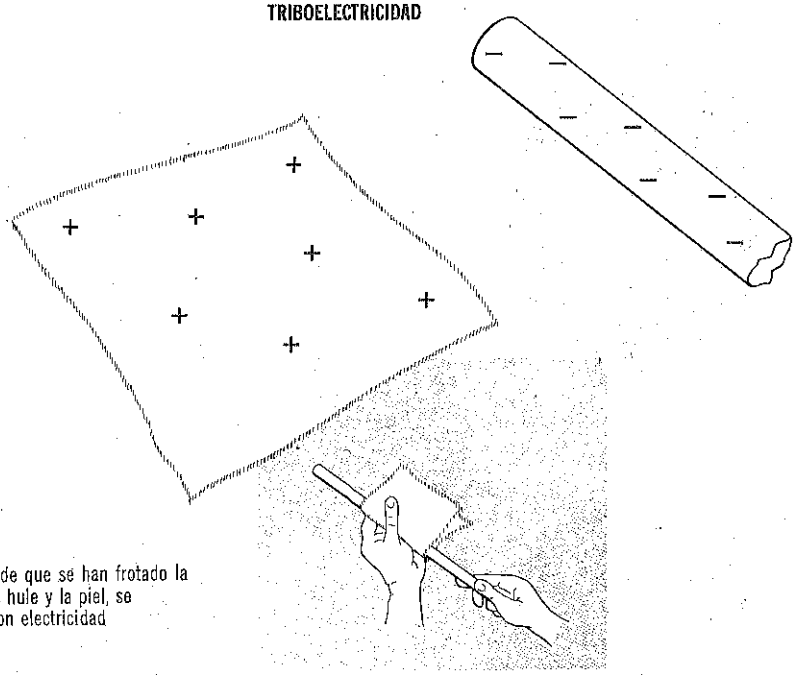
cómo se produce la electricidad

Hasta ahora, sólo se ha tratado en forma general de la idea de aplicar **una fuerza** o energía a los electrones para desalojarlos de sus órbitas; **pero todavía no se ha** dicho nada acerca de cómo lograrlo. Se puede **hacer esto** de diversas maneras, que suelen agruparse en seis grandes **categorías.**



electricidad producida por fricción

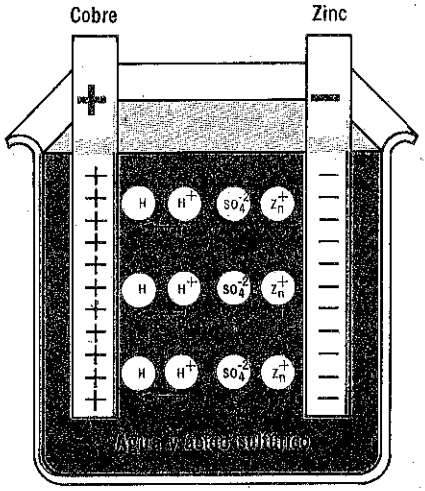
Este es el método que fue descubierto por los griegos, y que ya ha sido descrito en este mismo libro. Una carga eléctrica se produce cuando se frotan uno con otro dos pedazos de ciertos materiales; por ejemplo, seda y una varilla de vidrio, o cuando uno se peina el cabello. ¿Alguna vez ha caminado el lector sobre una alfombra y experimentado una descarga eléctrica al tocar una perilla metálica? Las suelas de los zapatos se cargan al frotarlos sobre la alfombra y esta carga se transfiere a la persona que, luego, se descarga en la perilla. Estas cargas reciben el nombre de *electricidad estática*, la cual se produce cuando un material *transfiere* sus *electrones* a otro.



Después de que se han frotado la varilla de hule y la piel, se cargan con electricidad

Esto es algo que aún no se entiende perfectamente. Pero una teoría dice que en la *superficie* de un material existen muchos átomos que no pueden combinarse con otros en la misma forma en que lo hacen, cuando están dentro del material; por lo tanto, los átomos superficiales contienen algunos electrones libres, ésta es la razón por la cual los aisladores, por ejemplo vidrio y caucho, pueden producir cargas de electricidad estática. La energía calorífica producida por la fricción del frotamiento se imparte a los átomos superficiales que entonces liberan los electrones. Esto se conoce como efecto *triboeléctrico*.

ELECTROQUIMICA



La pila "húmeda"

La solución que se conoce como electrolito, atrae a los iones positivos de la barra de zinc y libera electrones de la barra de cobre.

La batería "seca" de lámpara de mano ordinaria usa una pasta electrolítica en lugar de una solución flúida.

electricidad producida por reacciones químicas

Las substancias químicas pueden combinarse con ciertos metales para iniciar una actividad química en la cual habrá transferencia de electrones, produciéndose cargas eléctricas. Esta es la forma en que funciona una *batería* ordinaria. El proceso se basa en el principio de la *electroquímica.* Un ejemplo es la *pila húmeda básica.* Cuando en un recipiente de cristal se mezcla ácido sulfúrico con agua (para formar un *electrolito*) el ácido sulfúrico se separa en componentes químicos de hidrógeno (H) y sulfato (SO_4), pero debido a la naturaleza de la acción química, los átomos de hidrógeno son iones positivos (H^+) y los átomos de sulfato son iones negativos (SO_4^{-2}). El número de cargas positivas y negativas son iguales, de manera que toda la solución tiene una carga neta nula. Luego, cuando se introducen en la solución barras de cobre y cinc, éstas *reaccionan* con ella.

El cinc se combina con los átomos de sulfato; y puesto que esos átomos son negativos, la barra de cinc transmite iones de cinc positivos (Zn^+); los electrones procedentes de los iones de cinc quedan en la masa de cinc, de manera que la barra de cinc tiene un exceso de electrones, o sea, una *carga negativa.* Los iones de cinc se combinan con los iones de sulfato y los neutralizan, de manera que ahora la solución tiene más cargas positivas. Los iones positivos de hidrógeno atraen a electrones libres de la barra de cobre para neutralizar nuevamente la solución. Pero ahora la barra de *cobre* tiene una deficiencia de electrones, por lo que presenta una *carga positiva.*

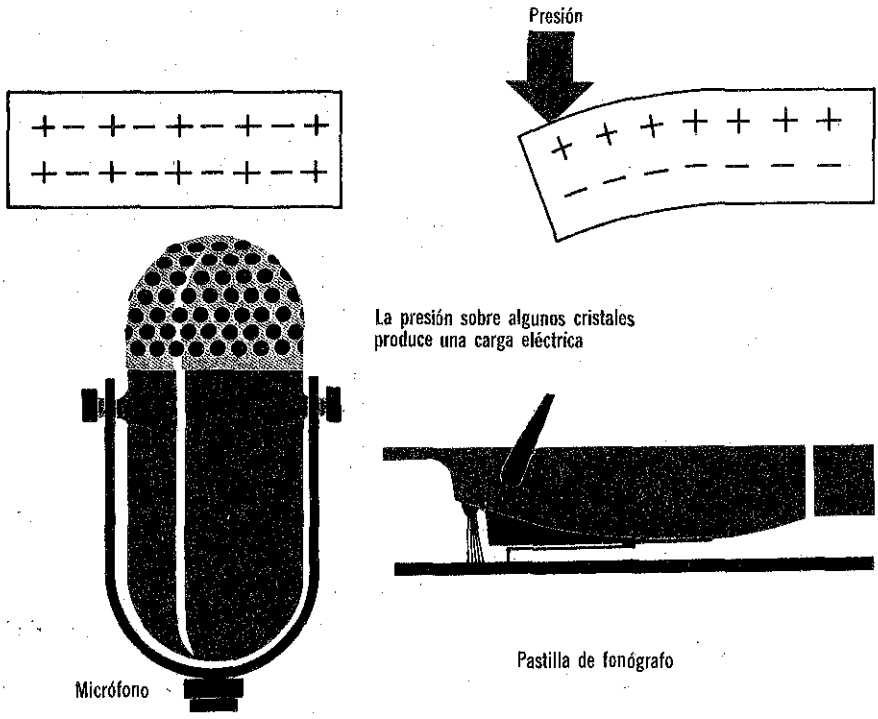
Las baterías y las pilas se estudian más detalladamente en el volumen seis.

electricidad producida por presión

Cuando se aplica presión a algunos materiales, la *fuerza* de la *presión* pasa a través del material a sus átomos, desalojando los electrones de sus órbitas y empujándolos en la misma dirección que tiene la fuerza. Estos huyen de un lado del material y se acumulan en el lado opuesto. Así pues, se originan cargas positivas y negativas en los lados opuestos. Cuando cesa la presión, los electrones regresan a sus órbitas. Los materiales se cortan en determinadas formas para facilitar el control de las superficies que habrán de cargarse; algunos materiales reaccionarán a una presión de *flexión* en tanto que otros responderán a una presión de *torsión*.

Piezoelectricidad es el nombre que se da a las cargas eléctricas producidas por el efecto de la *presión*. *Piezo* es un término que se deriva de la palabra griega que significa presión. El efecto es más notable en los cristales, por ejemplo sales de Rochelle, y en ciertas cerámicas como el titanato de bario. Los cristales piezoeléctricos se usan en algunos micrófonos y en pastillas de fonógrafo.

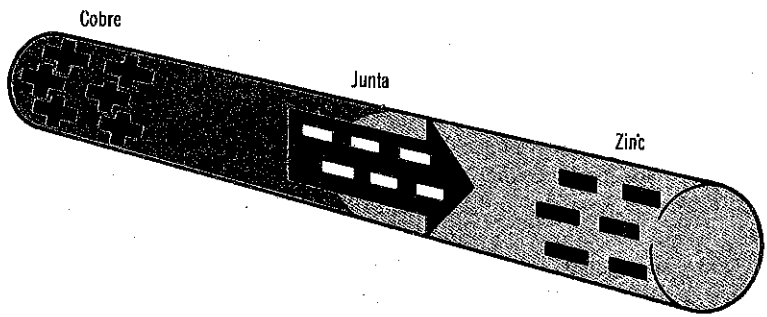
PIEZOELECTRICIDAD



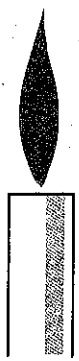
electricidad producida por calor

Debido a que algunos materiales liberan fácilmente sus electrones y otros materiales los aceptan, puede haber transferencia de electrones, cuando se ponen en contacto dos *metales distintos*, por ejemplo: Con metales particularmente activos, la energía calorífica del ambiente a temperatura normal es suficiente para que estos metales liberen electrones. Por ejemplo, el cobre y el cinc se comportan de esta manera. Los electrones saldrán de los átomos de cobre y pasarán al átomo de cinc. Así pues, el cinc adquiere un exceso de electrones, por lo que se carga negativamente. El cobre, después de perder electrones, tiene una carga positiva. Sin embargo, las cargas originadas a la temperatura ambiente son pequeñas, debido a que no hay suficiente energía calorífica para liberar más que unos cuantos electrones. Pero, si se aplica calor a la unión de los dos metales para suministrar más energía, se liberarán más electrones. Este método es llamado *termoelectricidad*. Mientras mayor sea el calor que se aplique, mayor será la carga que se forme. Cuando se retira la fuente de calor, los metales se enfriarán y las cargas se disiparán. El dispositivo descrito recibe el nombre de *termopar*. Cuando se unen entre sí varios termopares, se forma una *termopila*.

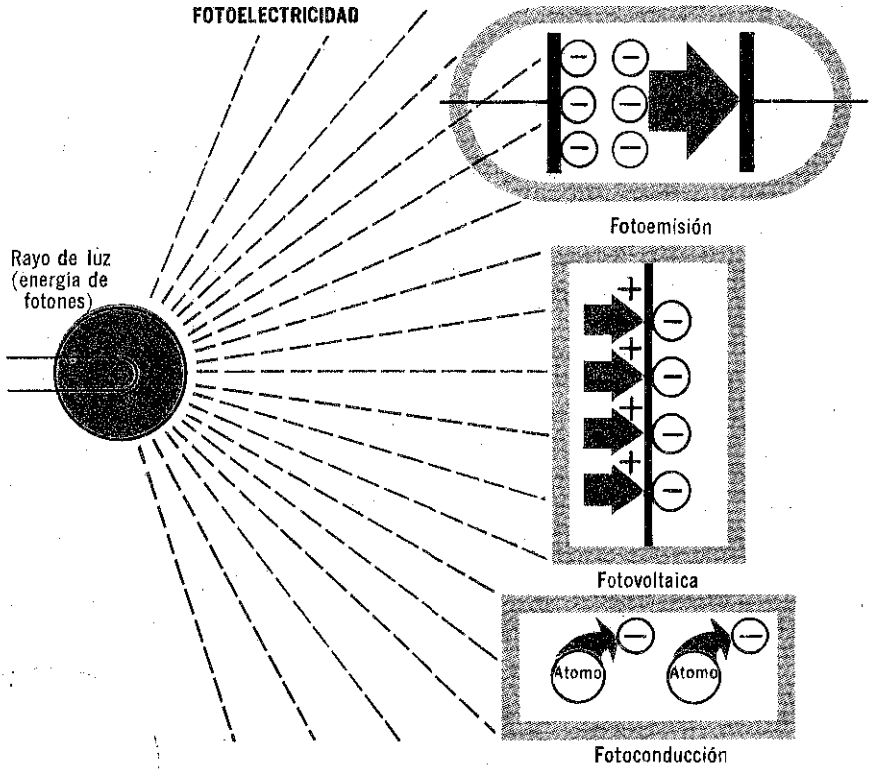
TERMOELECTRICIDAD



La energía calorífica hace que el cobre libere electrones hacia el zinc



ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
FERNANDO SUIREZ
"ACERVO"



electricidad producida por luz

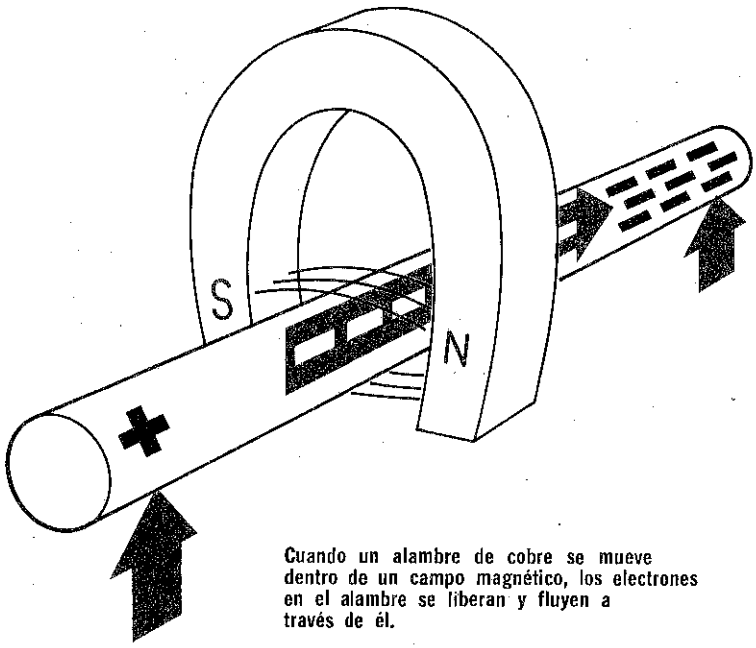
La luz en sí misma es una forma de energía y muchos científicos la consideran formada de pequeños "paquetes" de energía llamados *fotones*. Cuando los fotones de un rayo luminoso inciden sobre un material, liberan su energía. En algunos materiales, la energía procedente de los fotones puede ocasionar la liberación de algunos electrones de los átomos. Materiales tales como potasio, sodio, cesio, litio, selenio, germanio, cadmio y sulfuro de plomo, reaccionan a la luz en esta forma. El *efecto fotoeléctrico* se puede usar de tres maneras:

1. *Fotoemisión*: La energía fotónica de un rayo de luz puede causar la liberación de electrones de la superficie de un cuerpo que se encuentra en un tubo al vacío. Entonces una placa recoge estos electrones.
2. *Fotovoltaica*: La energía luminosa que se aplica sobre una de dos placas unidas, produce la transmisión de electrones de una placa a la otra. Entonces las placas adquieren cargas opuestas, en la misma forma que una batería.
3. *Fotoconducción*: La energía luminosa, aplicada a algunos materiales que normalmente son malos conductores, causa la liberación de electrones en los materiales, de manera que éstos se vuelven mejores conductores.

electricidad producida por magnetismo

Todos conocen los imanes, y los han manejado alguna que otra vez. Por lo tanto, podrán haber observado que, en algunos casos, los imanes se atraen y en otros casos se repelen. La razón es que los imanes tienen campos de fuerza que actúan uno sobre otro recíprocamente. (Esto se explica más adelante, con mayor detalle en este mismo tomo.)

ELECTROMAGNETISMO



Cuando un alambre de cobre se mueve dentro de un campo magnético, los electrones en el alambre se liberan y fluyen a través de él.

La fuerza de un campo magnético también se puede usar para desplazar electrones. Este fenómeno recibe el nombre de *magnetoelectricidad*; a base de éste un *generador* produce electricidad. Cuando un buen conductor, por ejemplo, el cobre, se hace pasar a través de un campo *magnético*, la *fuerza* del campo suministrará la energía necesaria para que los átomos de cobre liberen sus electrones de valencia. Todos los electrones se moverán en cierta dirección, dependiendo de la forma en que el conductor cruce el campo magnético; el mismo efecto se obtendrá si se hace pasar el campo a lo largo del conductor. El único requisito es que haya un movimiento relativo entre cualquier conductor y un campo magnético. (La magnetoelectricidad se examina más detenidamente al final del libro.)

resumen

Se puede lograr que los electrones salgan de sus órbitas aplicándoles una fuerza o energía. Los seis métodos usados para hacer esto son:

Efecto triboeléctrico, la electroquímica, piezoelectricidad, termoelectricidad, efecto foto-eléctrico y magnetoelectricidad.

☐ El efecto triboeléctrico es aquel en que los electrones superficiales de un material se liberan por el frotamiento. La energía procede de la fricción y el calor. ☐ La electroquímica consiste en combinar elementos químicos con ciertos metales, originándose una actividad química en la que habrá transferencia de electrones que producirán cargas.

☐ El efecto piezoeléctrico es aquel en que aparecen cargas eléctricas en las caras de ciertos cuerpos, cuando se los somete a presión. Es más notable en algunos cristales. ☐ La termoelectricidad es el término que se da al efecto de aplicar calor a dos metales distintos, con el objeto de producir cargas opuestas en los dos metales. ☐ El efecto fotoeléctrico es aquel en que los átomos de ciertos materiales liberen electrones cuando la energía luminosa en forma de fotones incide sobre estos materiales.

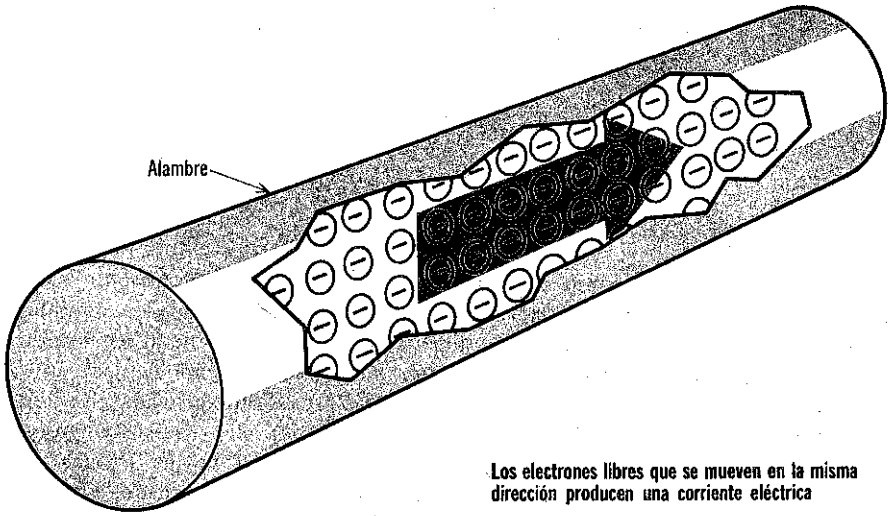
☐ Fotoemisión: la energía de los fotones libera electrones de una superficie en un tubo al vacío. Otra superficie en el tubo recoge los electrones. ☐ Fotovoltaica: la energía luminosa que incide en una de dos placas unidas hace que sus electrones sean liberados y pasen a la otra. Entonces las placas se comportan como una batería. ☐ Fotoconducción: la energía luminosa se aplica a ciertos materiales para convertirlos en mejores conductores. ☐ La magnetoelectricidad es el efecto de aplicar la fuerza de un campo magnético a un conductor para desplazar sus electrones.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo se logra que los electrones se escapen de sus órbitas?
2. ¿Qué efecto se obtiene si se aplica presión a un cristal de sal de Rochelle?
3. ¿En qué consiste el efecto triboeléctrico?
4. En termoelectricidad, el calor se aplica a la unión de dos metales _____.
5. ¿Cuál es la diferencia entre un termopar y una termopila?
6. ¿Qué son los fotones?
7. Indique y describa tres formas en que se pueda usar el efecto foto-eléctrico.
8. Si se quiere liberar electrones en un conductor por medio de una fuerza magnética, ¿es indispensable mover el conductor?
9. Describa la pila húmeda básica. Trabaja con base en el principio de _____.
10. El generador eléctrico trabaja con base en el principio de _____ _____.

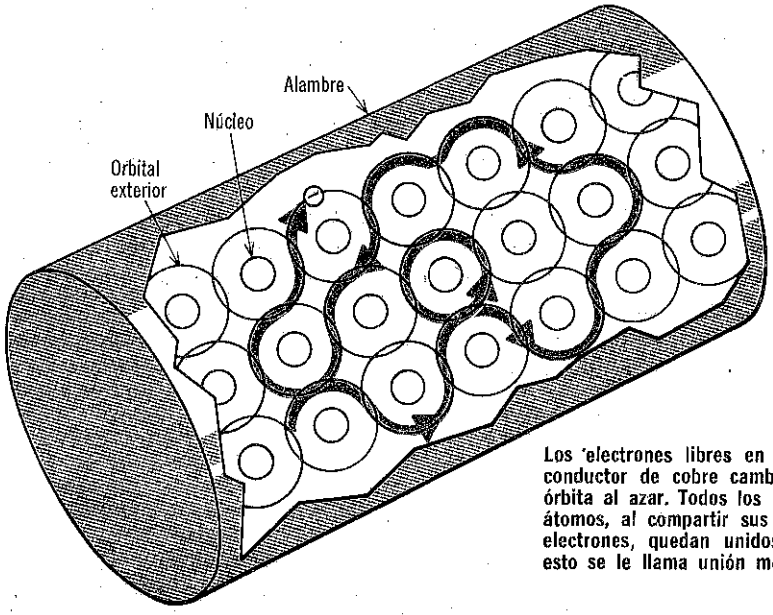
¿qué es la corriente eléctrica?

En el material presentado hasta ahora, se explicó lo que es la electricidad y cómo se producen las cargas eléctricas. En particular, se estudiaron temas relativos a la *electricidad estática,* es decir, a la *carga eléctrica en reposo.* Pero, por lo general, una carga eléctrica estática no puede desempeñar una función útil. Si se quiere usar energía eléctrica para realizar algún trabajo, es preciso que la electricidad se "ponga en marcha". Esto sucede cuando se tiene una corriente eléctrica. La corriente se produce, cuando en un conductor hay muchos *electrones libres* que se mueven en la misma dirección.



Los electrones libres que se mueven en la misma dirección producen una corriente eléctrica

Como se verá más adelante, todo electrón tiene cierta energía que puede producir determinados efectos. Los electrones suelen moverse en diversas direcciones, de manera que tales efectos se anulan. Pero cuando se hace que los electrones se muevan en la misma dirección, es decir, hay una corriente que fluye, entonces sus efectos se suman y la energía que liberan puede aprovecharse para realizar algún trabajo. Además, mientras mayor sea el número de electrones que se mueven en la misma dirección, mayor será el flujo de corriente y se dispondrá de mayor energía para efectuar algún trabajo. Por lo tanto, las corrientes mayores o menores, las produce un número mayor o menor, respectivamente, de electrones "puestos en marcha", en la misma dirección.



Los electrones libres en un conductor de cobre cambian de órbita al azar. Todos los átomos, al compartir sus electrones, quedan unidos. A esto se le llama unión metálica.

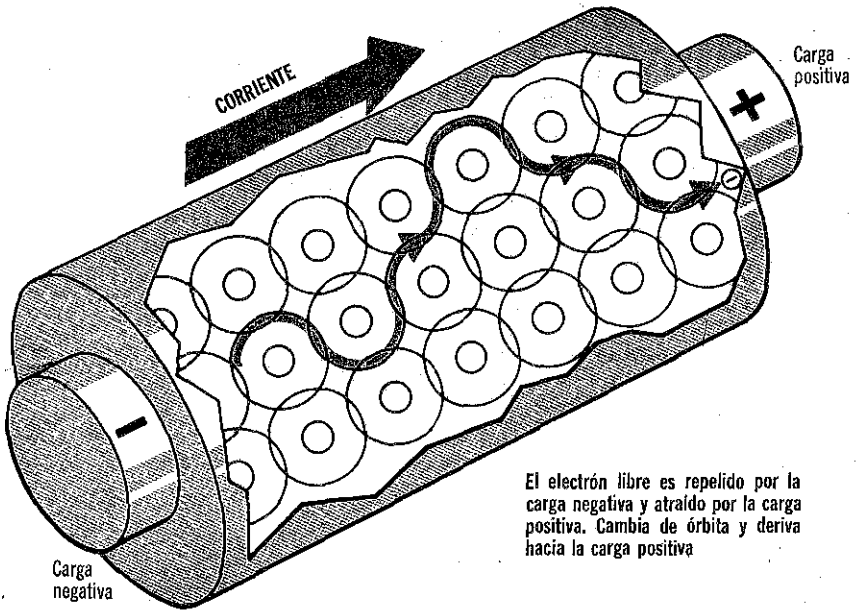
electrones libres

Para comprender cómo pueden los electrones producir corriente eléctrica, será útil ilustrar la forma en que los átomos de un buen conductor, por ejemplo el cobre, están unidos en un trozo del metal en estado sólido. Todos los materiales deben tener sus átomos (o moléculas) unidas en alguna forma, pues de lo contrario se desintegrarían. Existen diferentes tipos y formas de uniones; por eso, unos elementos son gases, algunos son líquidos y otros sólidos. Además, existen varias formas en que los átomos de los sólidos están unidos, y por esta razón algunos metales son suaves y otros duros. El tipo de unión que nos interesa para el estudio de la electricidad básica es la *unión metálica.*

En un conductor de cobre cada uno de los átomos tienen un electrón de valencia, que apenas se mantiene en órbita. Además, los átomos están tan próximos, uno del otro, que las *órbitas exteriores se sobreponen.* Al girar el electrón de un átomo, puede ser atraído por otro átomo e incorporarse a la órbita de éste. Aproximadamente al mismo tiempo, un electrón en el segundo átomo se desprende y pasa a la órbita de otro átomo. La mayor parte de los electrones exteriores continuamente cambian de órbita en esta forma, de manera que los electrones de valencia en realidad no están asociados con ningún átomo particular. Más bien, todos los átomos comparten a todos los electrones de valencia y así se unen entre sí. Los electrones están "libres" para moverse al azar. La acción es continua, de manera que todo átomo siempre tiene un electrón, cada electrón siempre está en un átomo. Por lo tanto, no hay carga eléctrica, pero el conductor tiene un gran número de electrones libres.

movimiento de los electrones

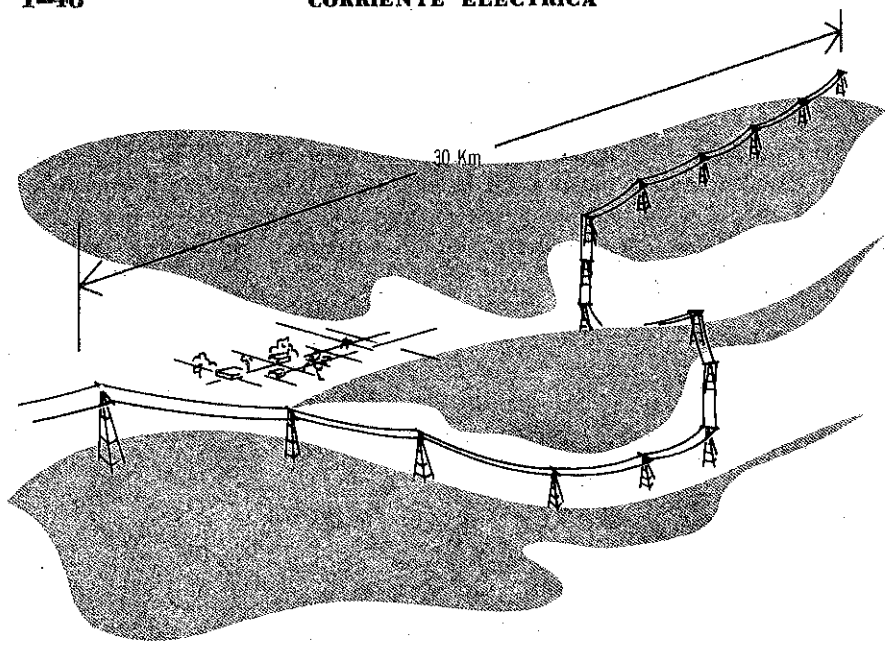
Para producir una corriente eléctrica, los electrones libres en el conductor de cobre deben moverse en la misma dirección, y no al azar. Esto se puede hacer aplicando cargas eléctricas en cada extremo del alambre de cobre; una carga negativa en un extremo y una carga positiva en el otro.



Puesto que estos electrones son negativos, la carga negativa los repele y los atrae la positiva. Debido a ello, no pueden pasar a aquellas órbitas que los harían moverse contra las cargas eléctricas. En cambio, se *desplazan* de órbita en órbita hacia la carga positiva, haciendo que se produzca una *corriente eléctrica* en esta dirección.

Se puede ver en el diagrama que la densidad de los átomos en el alambre de cobre es tal que las órbitas de valencia de cada átomo se superponen de manera que los electrones pasan fácilmente de un átomo a otro. La trayectoria que recorre el electrón depende de la dirección de las órbitas que el electrón encuentra en el camino que lo lleva hacia la carga positiva.

Puede verse que no siguen una línea recta. Pero en los extremos del conductor, donde las cargas son más intensas, éstas ejercen mayor control sobre cada electrón, de modo que sigue una trayectoria más próxima a la recta y se mueve con mayor rapidez a través del conductor.



Si un electrón libre tuviese que viajar a través de un conductor de 32.2 km, le llevaría más de 30 días. Sin embargo, una corriente eléctrica recorre esa distancia en una fracción de segundo.

flujo de corriente

Aunque a veces es más fácil considerar que los electrones que se mueven libremente constituyen la corriente eléctrica, es importante recordar que esto no es exacto. El movimiento del *electrón* libre *produce* la *corriente*. Esto se entiende mejor, si se compara la velocidad de un electrón con la de la corriente. La velocidad del electrón puede variar, según el material conductor y el número de cargas eléctricas usadas. Pero la velocidad de la corriente siempre será la misma.

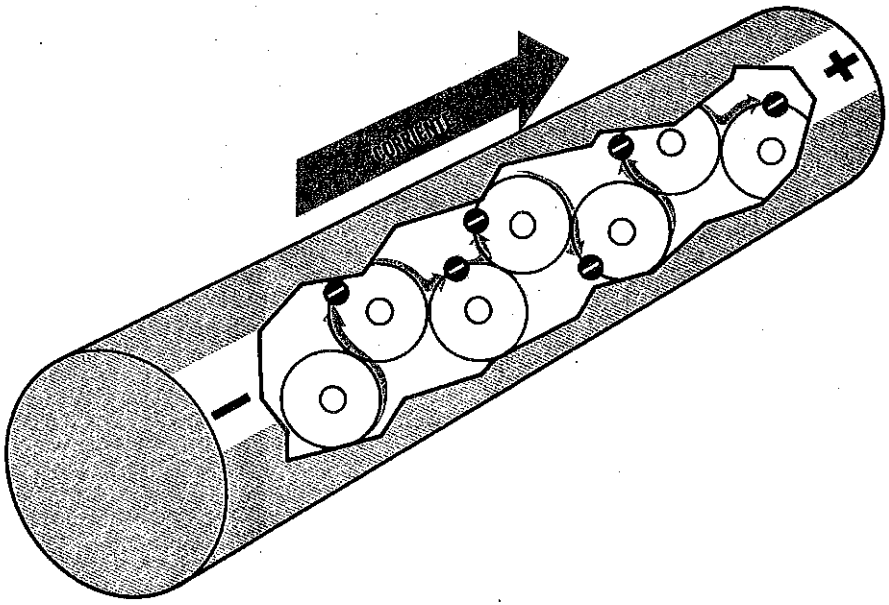
El electrón libre que se mueve al azar, lo hace con rapidez relativa debido a que está únicamente bajo la influencia de las fuerzas atómicas orbitales; su velocidad puede ser de unos cuantos *cientos de kilómetros por segundo*.

El electrón libre que se encuentra bajo la influencia de las cargas electrostáticas tiene que oponerse a alguna de las fuerzas orbitales atómicas de manera que su velocidad disminuye considerablemente. En ciertos casos avanza velocidades que pueden medirse en *centímetros por segundo*. Esto es sumamente lento, en comparación con la velocidad de la corriente eléctrica, que es igual a la de la luz: 300,000 *kilómetros por segundo*.

el impulso de corriente

La *corriente* eléctrica, en realidad es el *impulso* de energía eléctrica que transmite un electrón a otro, al cambiar de órbita. Cuando se aplica energía a un electrón y éste se desprende de su órbita, al salir de ella, tiene que toparse con alguna órbita de otro átomo, ya que todas las órbitas exteriores se superponen y obstruyen el paso libre del electrón. Cuando el electrón liberado entra a la nueva órbita, su carga negativa

Al salir un electrón de su órbita y entrar a otra, repele un electrón y lo expulsa de ésta, repitiéndose el proceso de átomo a átomo a lo largo del conductor.

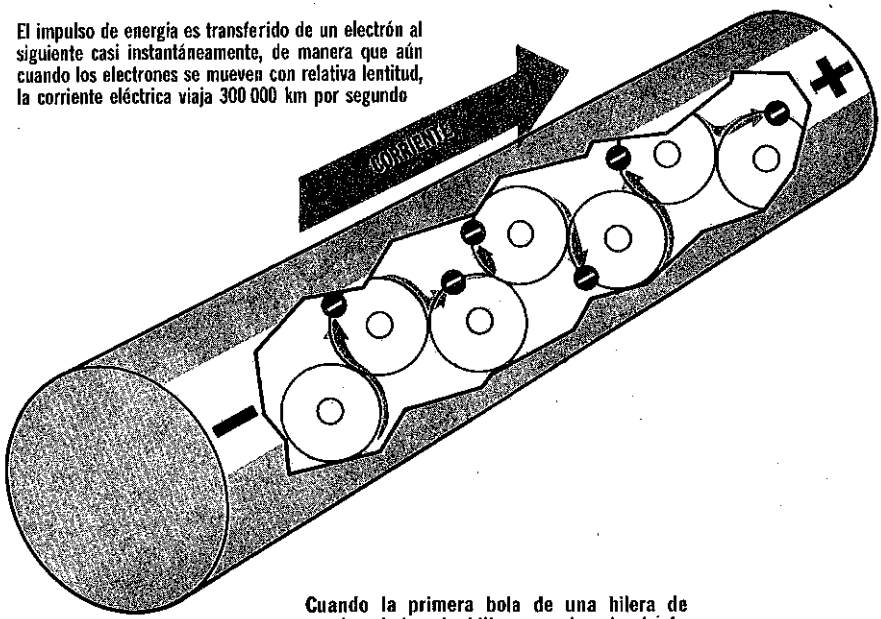


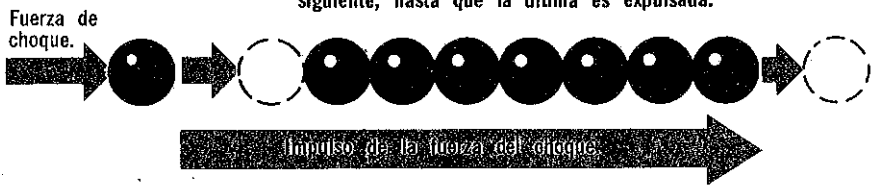
El impulso transferido de un electrón al siguiente en la línea, constituye la corriente eléctrica

reacciona con la carga negativa del electrón que se encontraba en la órbita antes de él. El primer electrón *repele* al otro, expulsándolo de la órbita y, a la vez, trasmitiéndole su energía. El segundo electrón, al encontrarse en la órbita siguiente, repite lo que hizo el primero. Este proceso continúa en todo el alambre. El impulso de energía, transferido de un electrón al siguiente, constituye la corriente eléctrica.

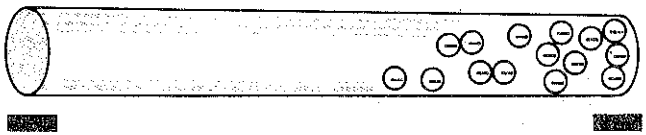
velocidad de la corriente eléctrica

Puesto que los átomos están muy próximos uno de otro y las órbitas se superponen, el electrón liberado no tiene que ir muy lejos para encontrar una órbita nueva. El momento en que entra a la nueva órbita, transfiere su energía al siguiente electrón, liberándolo. La acción es casi instantánea. Lo mismo ocurre con todos los electrones en movimiento, de manera que aunque cada electrón se mueve con relativa lentitud, el impulso de la energía eléctrica se transfiere a través de la línea de átomos a una velocidad muy grande: 300,000 *kilómetros por segundo.* Se considera que los electrones libres son *portadores de corriente.*

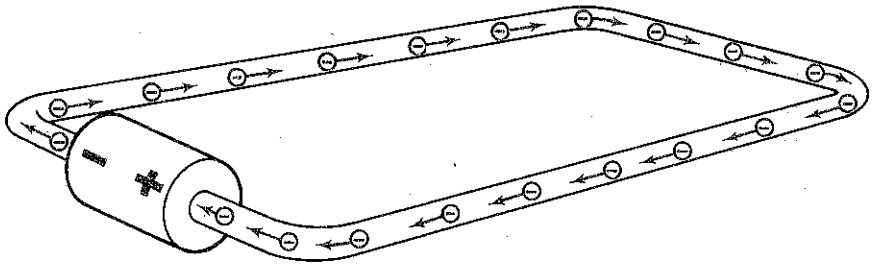




Una buena analogía de esta *transferencia de impulso* sería una larga hilera de bolas de billar. Cuando la bola que juega choca con la que está en el extremo de la fila, su fuerza se transmite de una bola a la siguiente hasta que salga disparada la bola en el otro extremo. La última bola se separa de la fila casi en el mismo instante en que es tocada la primera.



Una carga negativa colocada en un extremo de un conductor repelerá a los electrones al extremo hasta que se desarrolle una carga igual para detener el flujo de electrones. Pero, si una fuente de potencia aplica cargas opuestas a ambos extremos del conductor, los electrones continuarán viajando



Un electrón abandona el lado negativo de la batería por cada electrón que entra al lado positivo

UN CIRCUITO COMPLETO O CERRADO

el circuito completo (cerrado)

Si se aplicara una carga negativa en un extremo del alambre, esta carga repelería a los electrones libres del otro extremo del alambre. La corriente fluiría sólo por un instante hasta que se acumularan suficientes electrones en el otro extremo para producir una carga negativa igual que evitaría que ingresaran electrones. Esta sería *electricidad estática* debido a que todo quedaría en reposo.

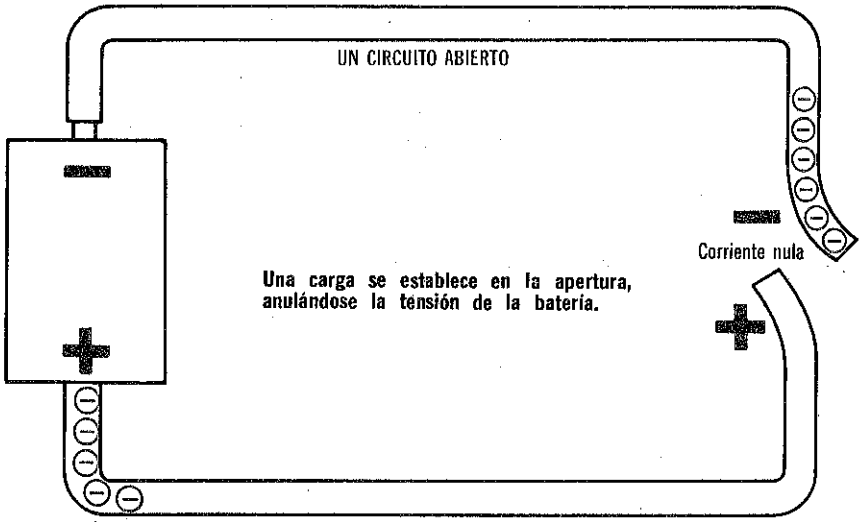
Para tener una corriente eléctrica, los electrones libres deben mantenerse en movimiento. Esto se logra fácilmente, si se usa una fuente de energía para aplicar cargas opuestas a *los dos* extremos del alambre. Entonces, la carga negativa repelerá los electrones en todo el alambre. En el lado positivo, los electrones serán atraídos a la *fuente;* pero por cada electrón que entre en la fuente, habrá otro electrón que ésta suministrará al alambre por el lado negativo. Por consiguiente, la corriente seguirá fluyendo a través del alambre en tanto se continúe aplicando las cargas eléctricas de la fuente de energía. A esto se llama *circuito completo* o *cerrado*. Una batería es una típica fuente de energía eléctrica.

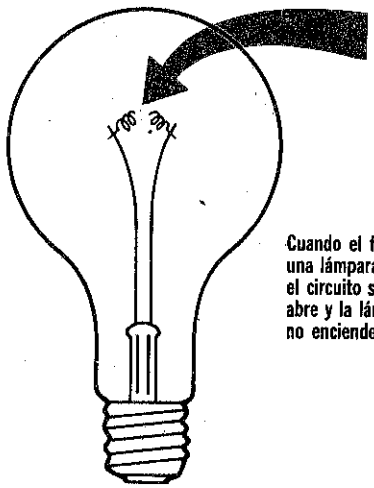
El circuito debe ser completo o cerrado para que fluya la corriente.

circuito abierto

Si el alambre se rompiera en cualquier punto, entonces, en la parte conectada al lado negativo de la batería, los electrones se acumularían en el extremo en que se rompió el alambre, mientras que, en la otra parte, el lado positivo de la batería atraería los electrones hacia sí. Así se establecería una carga en la apertura, ssupendiéndose el movimiento de los electrones. La corriente cesaría de fluir.

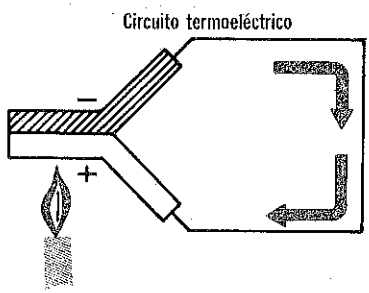
Un circuito abierto no conducirá corriente.

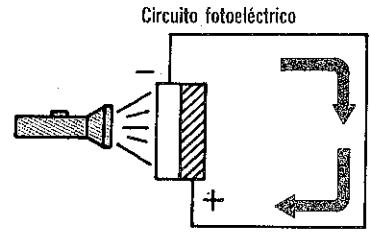


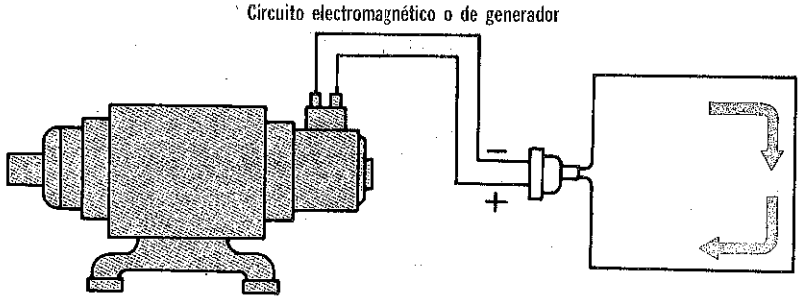


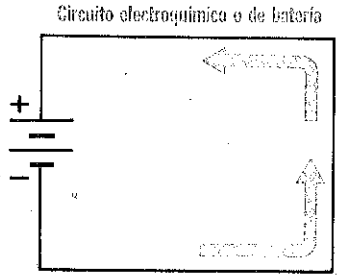
Cuando el filamento de una lámpara se rompe, el circuito se abre y la lámpara no enciende

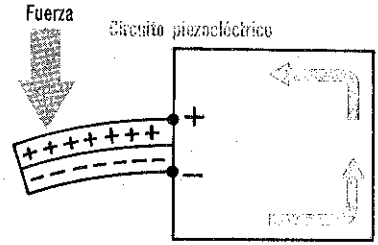
fuente de energía eléctrica



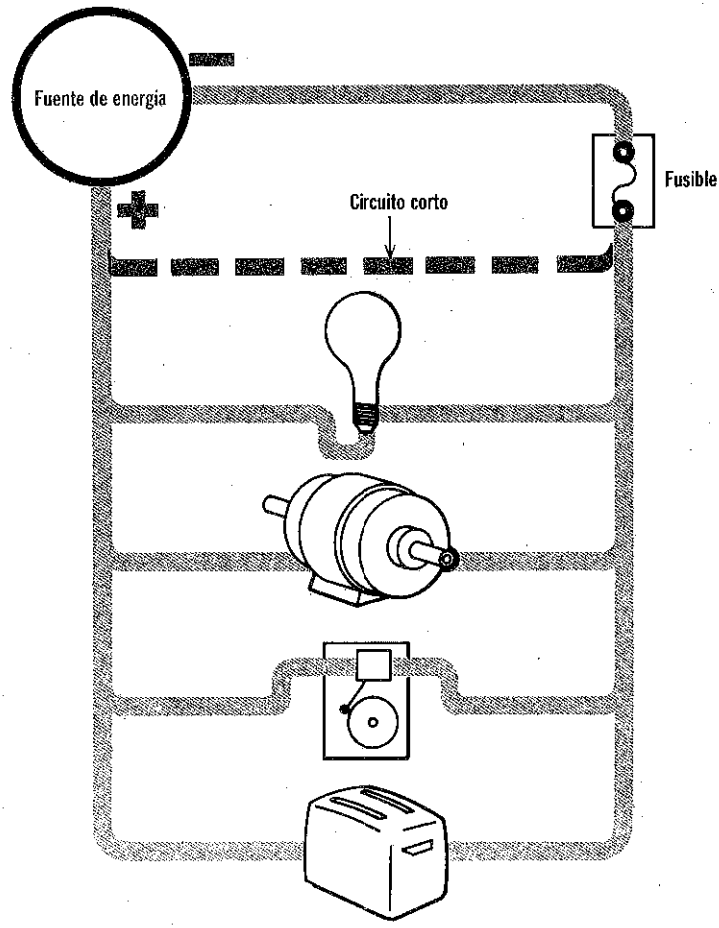








Cualquiera de los cinco tipos de fuentes descritos en las páginas 1-39 a 1-43, se pueden usar para hacer que una corriente pase a través de un alambre. La batería y el generador son los más comunes. La fuente para los enchufes eléctricos de su casa es un generador distante.



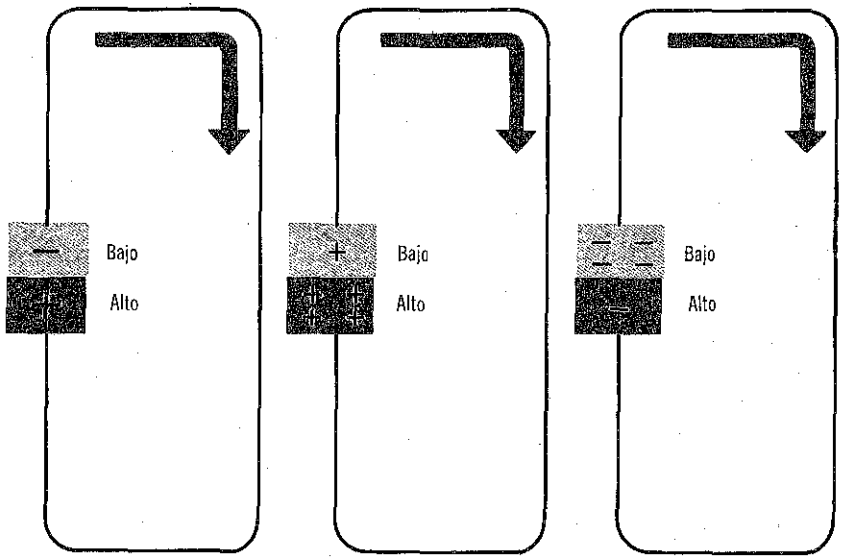
usos prácticos de la electricidad

En realidad, cuando un alambre que es buen conductor se pone en contacto con las *dos terminales* de una batería o generador, se produce un *corto circuito,* porque así circula mucha más corriente de la que puede suministrar la batería o generador. La batería o generador puede quemarse y el alambre se calentará excesivamente. Por esta razón se utilizan fusibles protectores. Cuando fluye demasiada corriente, éstos se funden y "abren" el circuito.

El alambre sirve para llevar corriente a otros elementos que van a realizar algún trabajo. Por ejemplo, conduce corriente que calienta el filamento de un foco eléctrico, para que emita luz; suministra energía eléctrica para hacer girar un motor, sonar una campana, calentar un tostador, etc. Algunas de estas aplicaciones se explican al final de este libro.

unidades eléctricas de medida

Ahora puede verse que existen dos condiciones para que haya flujo de corriente: 1) cargas eléctricas para mover a los electrones libres, y 2) un circuito completo por el que pueda fluir la corriente eléctrica. Se pueden usar diferentes cantidades de carga eléctrica y pueden producirse diferentes cantidades de corriente. Para medir todos estos valores, existen unidades apropiadas.



La corriente eléctrica fluye de un potencial bajo a un potencial alto, o entre cualquier diferencia de potencial

La carga eléctrica que adquiere un objeto se llama potencial eléctrico, debido a que los electrones desplazados acumulan energía potencial que se puede utilizar para mover a otros electrones. Puesto que se necesitan dos cargas para completar un circuito, la *diferencia de potencial* entre estas dos cargas es lo que proporciona la fuerza eléctrica. Se considera que el *negativo* es un *potencial bajo* y el positivo un *potencial alto. La corriente eléctrica* en un alambre siempre va *del potencial bajo al alto.* Esto también significa que la corriente fluirá de un potencial positivo bajo a un potencial positivo alto, así como entre dos potenciales negativos.

fuerza electromotriz (tensión, voltaje)

La *carga* eléctrica que adquiere un objeto está determinada por el *número de electrones* que pierde o gana. Puesto que el número de electrones que se mueven así es sumamente grande, se usa una unidad llamada *coulomb* para indicar la carga. Si un objeto tiene una carga negativa de 1 coulomb, esto indica que ha ganado 6.28×10^{18} (trillones) de electrones extras. Esto es 6.280,000.000,000.000,000 electrones.

Cuando dos cargas tienen una diferencia de potencial, la fuerza eléctrica resultante se llama *fuerza electromotriz* (fem). La unidad que se usa para indicar la intensidad de la fem es el *volt*. Cuando una diferencia de potencial causa el paso de 1 coulomb de corriente para producir 1 joule de trabajo, la fem es un volt. Algunas tensiones típicas que probablemente conoce el lector son: 1.5 volts para una pila de batería de mano; 6 volts para las baterías de automóviles antiguos; 12 volts para las más modernas; 115 volts en el hogar; 220 volts para potencial industrial, etc. De hecho, los voltajes varían desde *microvolts* (millonésimas de volt) a *megavolts* (millones de volts). Los términos potencial, fuerza electromotriz (fem) y tensión o voltaje con frecuencia se usan indistintamente.

UNIDADES DE TENSIÓN

Una carga de 1 coulomb = 6.28×10^{18} electrones
Una fem de 1 volt (v) = 1 coulomb que efectúa un trabajo de 1 joule
1 microvolt (μv) = 1/1.000,000 volt
1 milivolt (mv) = 1/1,000 volts
1 kilovolt (kv) = 1,000 volts
1 megavolt (megav) = 1.000,000 volts

CONVERSIÓN DE CANTIDADES

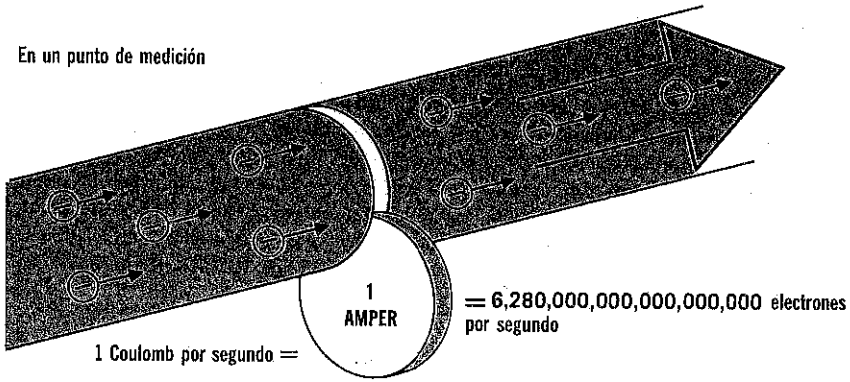
volts (v) × 1,000 = milivolts (mv)
volts (v) × 1.000,000 = microvolts (μv)
milivolts (mv) × 1,000 = microvolts (μv)
volts (v) ÷ 1,000 = kilovolts (kv)
volts (v) ÷ 1.000,000 = megavolts (megav)
megavolts (megav) 1,000 = kilovolts (kv)

---

milivolts (mv) ÷ 1,000 = volts (v)
microvolts (μv) ÷ 1.000,000 = volts (v)
microvolts (μv) ÷ 1,000 = milivolts (mv)
kilovolts (kv) × 1,000 = volts (v)
megavolts × 1.000,000 = volts (v)
kilovolts ÷ 1,000 = megavolts

---

1 v = 1,000 mv = 1.000,000 μv = 0.001 kv = 0.000001 megav



cantidad de corriente (ampere)

La cantidad de corriente que fluye en un alambre está determinada por el número de electrones que pasan por un punto dado, en un segundo. Según se ha mencionado antes, 1 coulomb es 6.28×10^{18} electrones. Si un *coulomb* pasa en un punto en un *segundo,* se tendrá una corriente de 1 *amper.* El término de la unidad, amper, se deriva del nombre de otro hombre de ciencia del siglo XVIII, A. M. Ampere. La corriente se mide también en *microamperes* (millonésimas de amper) y *miliamperes* (milésimas de amper).

UNIDADES DE CORRIENTE

1 amper(a) = 1 coulomb/seg
1 miliamper (ma) = 1/1,000 amper
1 microamper (μa) = 1/1.000,000 amper

CONVERSIÓN DE CANTIDADES

amperes (a) × 1,000 = miliamperes (ma)
amperes (a) × 1.000,000 = microamperes (μa)
miliamperes (ma) × 1,000 = microamperes (μa)

miliamperes (ma) ÷ 1,000 = amperes (a)
microamperes (μa) ÷ 1.000,000 = amperes (a)
microamperes (μa) ÷ 1,000 = miliamperes (ma)

0.5 a = 500 ma = 500,000 μa

resumen

☐ Las uniones metálicas son importantes en el estudio de la electricidad. ☐ Los electrones de un metal se desprenden fácilmente de sus órbitas. Cuando a un electrón se le aplica un poco de fuerza, éste pasa a la órbita de otro átomo. Los átomos están tan cerca uno de otro que sus órbitas se sobreponen. ☐ Los electrones de valencia pueden pasar fácilmente de un átomo a otro. ☐ Cuando una fuerza hace que los electrones se muevan en una dirección específica, se origina una corriente eléctrica. ☐ La fuerza que mueve a los electrones es una fuerza electromotriz, fem. También se la llama tensión o voltaje y potencial.

☐ La velocidad de un electrón libre que se desplaza al azar puede ser de unos cuantos cientos de kilómetros por segundo. Bajo la influencia de una fem, su velocidad será mucho menor. ☐ Aunque la velocidad de un electrón que se mueve bajo la influencia de una fem es baja, el impulso de energía que se transfiere de un electrón a otro es a 300,000 kilómetros por segundo. Ésta es la velocidad de la corriente eléctrica. ☐ Una corriente no fluirá en un circuito a menos que pueda seguir una trayectoria ininterrumpida, es decir, completa. De otra suerte, se dice que el circuito está abierto. Cuando el circuito está cerrado, hay una trayectoria completa. ☐ La batería y el generador son las fuentes de fuerza (fem) comúnmente usadas para transferir electrones. ☐ Para evitar el excesivo flujo de corriente, se usan fusibles para abrir el circuito y protegerlo.

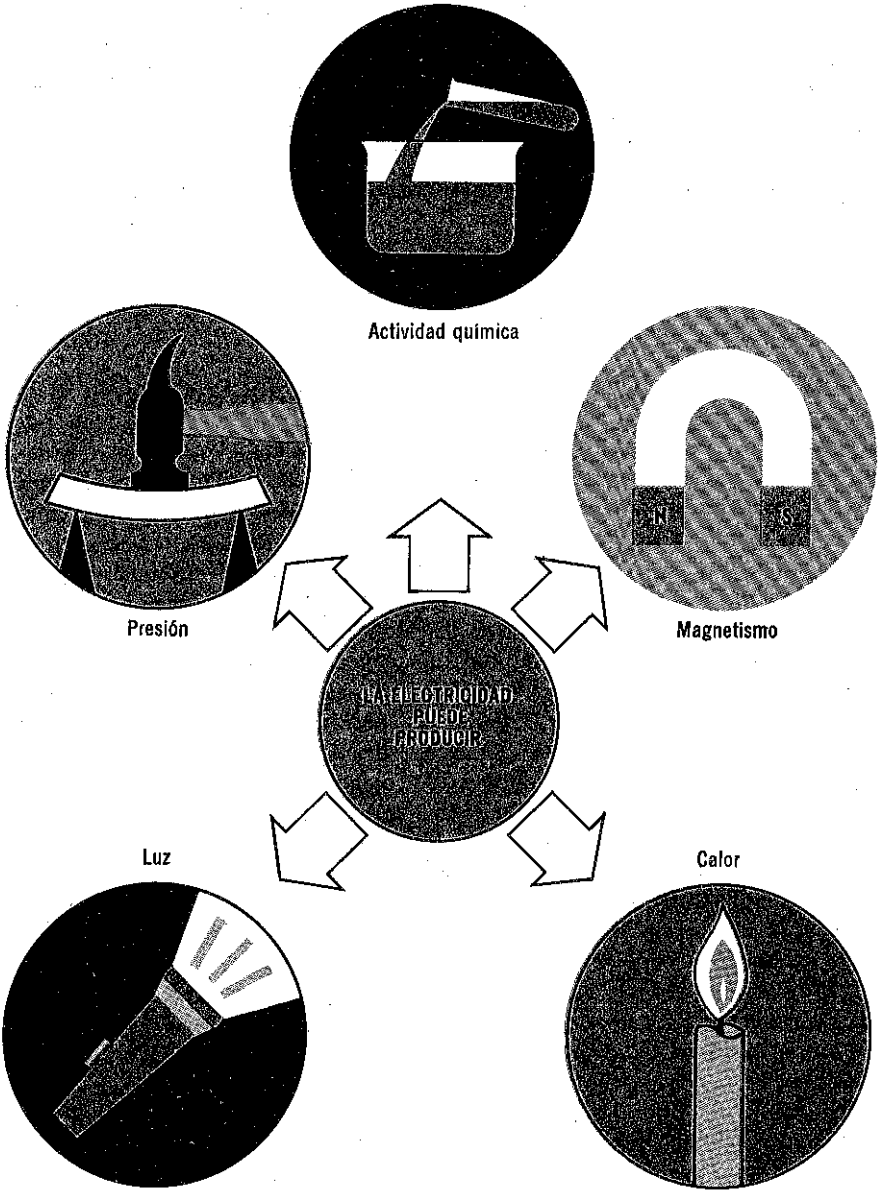
☐ La corriente electrónica en un alambre siempre va del potencial bajo al alto. ☐ La unidad básica de fem es el volt; otras unidades son el microvolt (μv), el milivolt (mv), el kilovolt (kv) y el megavolt (megav). ☐ La cantidad de 6.28×10^{18} electrones constituye el coulomb. ☐ La unidad básica de corriente eléctrica es el amper (a), que es un coulomb por segundo; otras unidades son el microamper (μa) y el miliamper (ma).

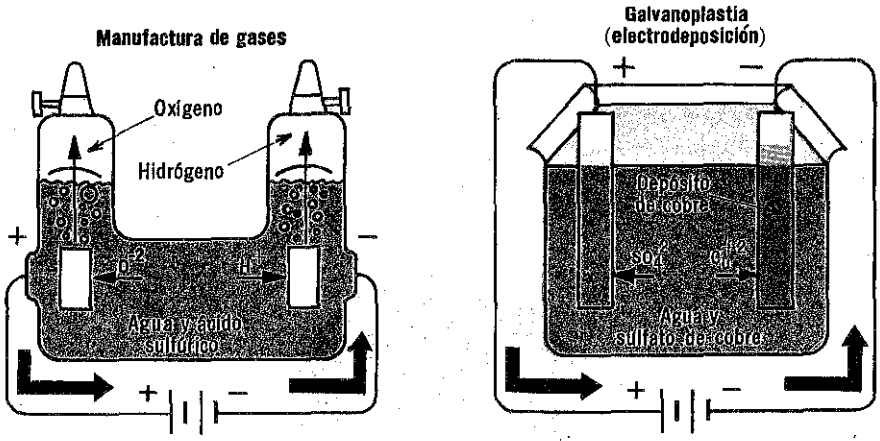
preguntas de repaso

1. ¿Qué es la corriente eléctrica y en qué unidades se mide?
2. ¿Qué es una unión metálica?
3. ¿Se sobreponen una a otra las órbitas de los átomos de un conductor?
4. ¿Es de 300,000 kilómetros por segundo la velocidad de los electrones que se desplazan de átomo a átomo, quedando bajo la influencia de una fem?
5. ¿Con qué velocidad huye la *corriente* eléctrica? ¿Por qué es diferente de la velocidad del electrón?
6. ¿Qué significa un coulomb de carga? ¿Un amper?
7. ¿Qué significa la diferencia de potencial, tensión o voltaje y fem?
8. ¿Cuántos volts hay en 2,500 megavolts? ¿En 2,500 milivolts?
9. ¿Qué es un microamper? ¿Un miliamper?
10. ¿Cómo evita un fusible que pase demasiada corriente en un circuito?

efectos de la electricidad

Salvo lo que respecta a la fricción, la electricidad se usa para producir los mismos fenómenos que se describireon en la página 1-37 y que, también, se usan para producir electricidad.





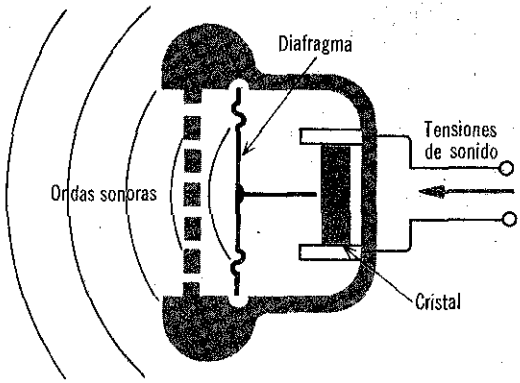
El potencial eléctrico y la corriente descomponen a los electrolitos en iones

La electricidad produce actividad química

Puesto que la carga eléctrica es la principal fuerza de unión a la que se debe la unión química de los compuestos, se puede usar un potencial o corriente eléctricos para alterar los procesos químicos normales. En electroquímica, esto se llama *electrólisis*. Por ejemplo, si se hace pasar corriente eléctrica a través de agua (H_2O) que contiene una pequeña cantidad de ácido sulfúrico, las moléculas de agua se separarán en átomos de hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, los átomos de oxígeno no liberan a los electrones de los átomos de hidrógeno que previamente compartían. Por lo tanto, los átomos de hidrógeno se convierten en iones positivos (H^+) y los átomos de oxígeno en iones negativos (O^{-2}). Los iones son atraídos hacia los *electrodos* cargados con signo opuesto.

En el electrodo negativo, los iones positivos de hidrógeno recogen electrones, se vuelven neutros y escapan del agua como gas. En el electrodo positivo, los iones negativos de oxígeno entregan electrones, se vuelven neutros y también escapan del agua como gas. Entonces, los dos gases se pueden envasar. Puesto que un electrón entra al electrodo negativo para substituir a cada electrón recogido por un ion de hidrógeno y que un electrón sale del electrodo positivo por cada electrón que entrega un átomo de oxígeno, la corriente continúa fluyendo hasta que toda el agua se convierte en hidrógeno y oxígeno gaseosos.

Otra aplicación de la electrólisis es la *galvanoplastia*. Si el agua se mezcla con sulfato de cobre ($CuSO_4$), el sulfato de cobre se dividiría en iones positivos de cobre (Cu^{+2}) y iones negativos de sulfato (SO_4^{-2}). Los iones de cobre irían al electrodo negativo y recogerían electrones. Pero como el cobre es un metal, se adhiere al electrodo. Después de algún tiempo, el electrodo se encuentra totalmente cubierto de cobre. En la misma forma puede sobreponerse a un objeto una capa de plata o de oro.

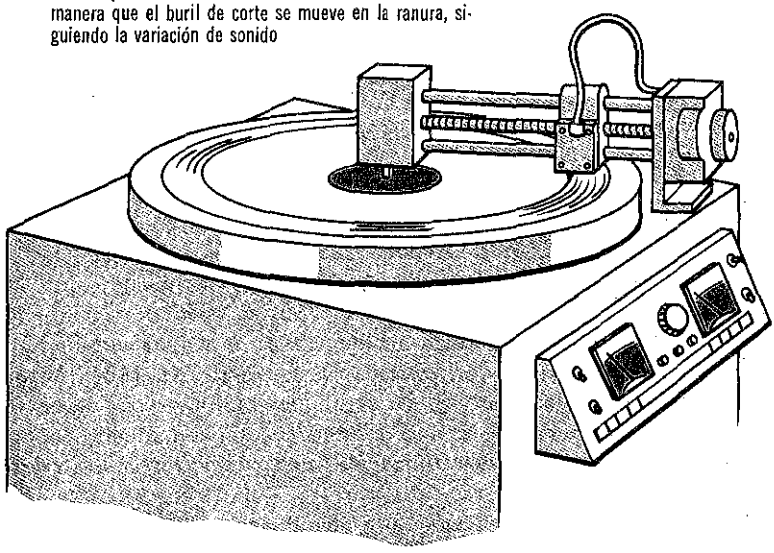


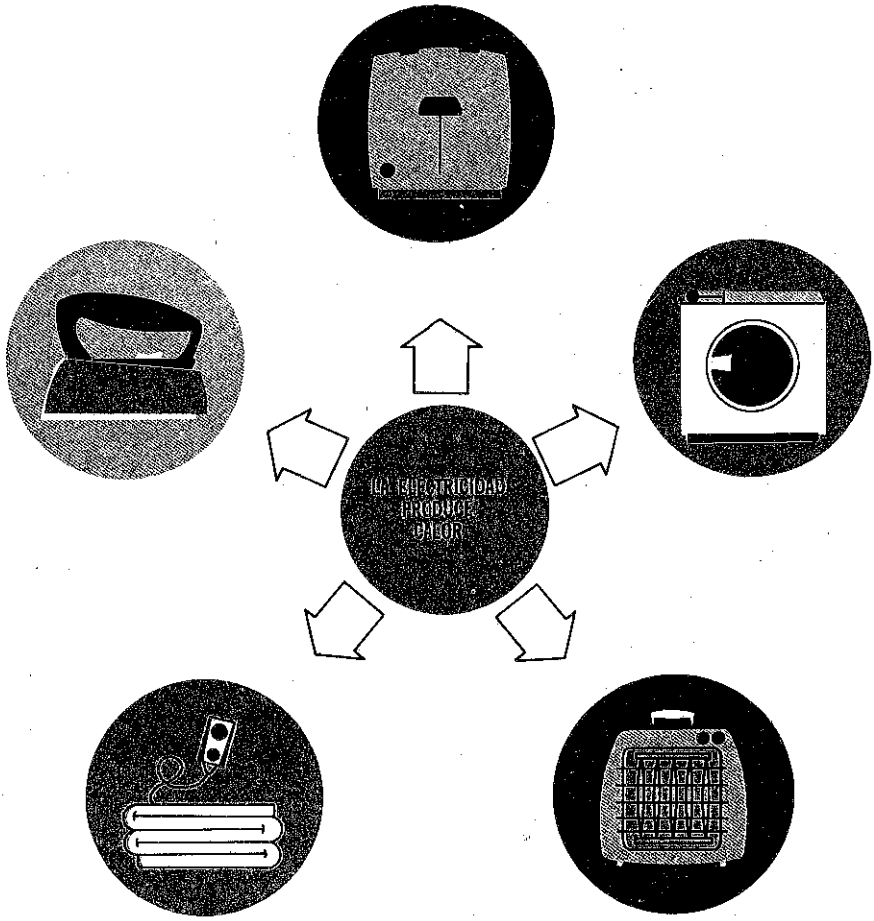
Cuando se aplican tensiones de sonido a un audífono de cristal, el cristal se deforma y hace vibrar a un diafragma, que causa ondas de sonido audibles en el oído

la electricidad produce presión

Tal como una fuerza o presión que flexiona o tuerce ciertos cristales produce en ellos una carga piezoeléctrica, así la aplicación de un voltaje hará que el cristal se flexione o se tuerza. Si se aplica un potencial eléctrico sobre una pastilla de cristal de sal de Rochelle, la fuerza del campo eléctrico ejercerá una presión piezoeléctrica sobre la estructura atómica del cristal y modificará la forma del mismo. En este principio se basa el funcionamiento de un audífono de cristal, así como el método usado para grabar discos fonográficos.

La cabeza cortadora de cristal se doblará o torcerá cuando se aplica tensión de sonido. El cristal se dobla de manera que el buril de corte se mueve en la ranura, siguiendo la variación de sonido





la electricidad produce calor

La corriente eléctrica, al fluir a través de un conductor, siempre produce algo de *calor*. Esto se debe a que cierta parte de energía se gasta en hacer que fluya la corriente y se libera en forma de calor. Puesto que se necesita menor energía para hacer fluir la corriente en los buenos conductores, en ellos se produce menos calor. Un mal conductor, por ejemplo el nicrómel, cuando conduce la corriente se calienta mucho. El cobre es aproximadamente 60 veces mejor conductor que el nicrómel.

Los efectos caloríficos de la electricidad se usan en muchos aparatos: como tostadores, planchas, secadores eléctricos, cobertores eléctricos, calentadores, etcétera.

Sin embargo, cabe notar que aun los buenos conductores producen algo de calor.

la electricidad produce luz

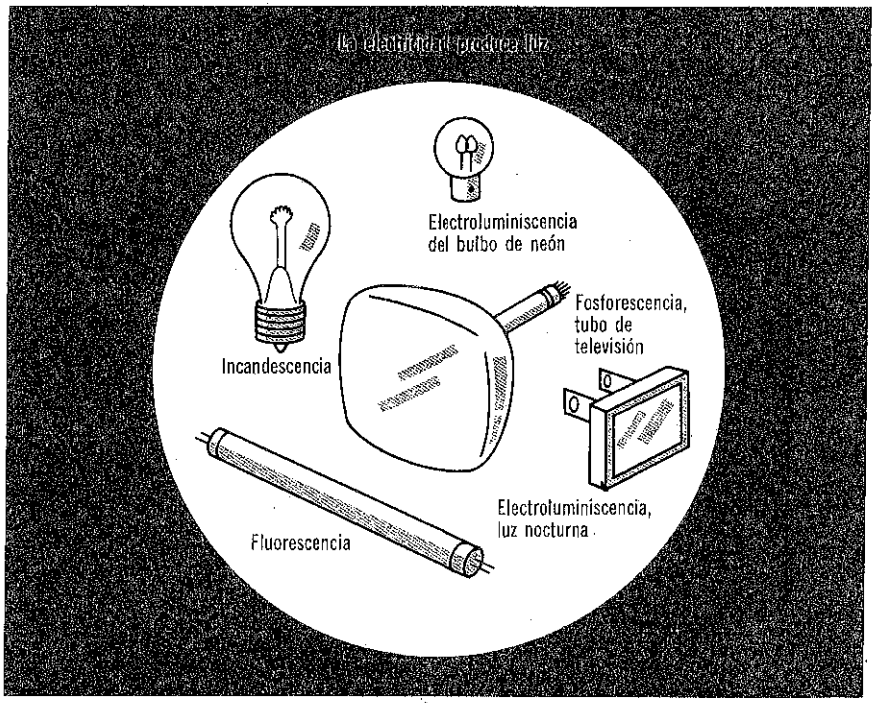
Muchos malos conductores, cuando conducen la corriente, se calientan al rojo vivo y hasta al rojo blanco. Debido a esta incandescencia, emiten luz además de calor. Este es el principio que se aplica en la *lámpara incandescente* ordinaria.

La energía eléctrica también puede aprovecharse para producir luz sin mucho calor, usando métodos tales como *fluorescencia, fosforescencia* y *electroluminiscencia.*

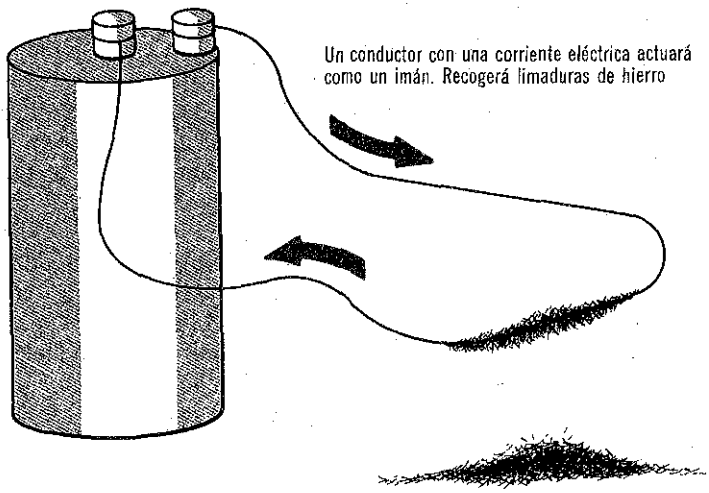
La *electroluminiscencia* la producen algunas substancias sólidas cuando conducen corriente. Sin embargo, la cantidad de luz que emiten es poca y se usan principalmente para efectos publicitarios y decorativos. Muchos gases, cuando conducen corriente, se ionizan y producen radiaciones luminosas. El neón, el argón y el vapor de mercurio constituyen algunos ejemplos. Se usan en los anuncios de "neón" que se observan en las avenidas importantes de la ciudad.

La *fosforescencia* ocurre cuando un haz de electrones incide en algunos *fósforos* y otros materiales especiales. El cinescopio de televisión se basa en este principio.

La *fluorescencia* combina la electroluminiscencia y la fosforescencia. Un gas, por ejemplo, el vapor de mercurio, al conducir la corriente eléctrica, se ioniza y emite radiación ultravioleta. La radiación incide en una capa fosforescente y emite luz "blanca".



La electricidad produce magnetismo



la electricidad produce magnetismo

Tal como el magnetismo puede producirse mediante la electricidad, así la electricidad es producida por magnetismo. Cualquier conductor en que fluye la corriente eléctrica, se comportará como un imán. A esto se le llama *electromagnetismo*. El magnetismo y el electromagnetismo se explican más detalladamente en la página siguiente.

resumen

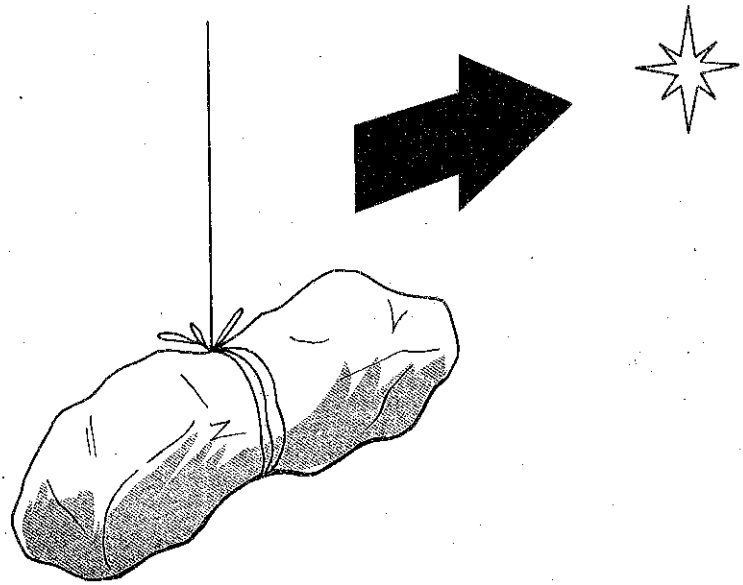
☐ La electricidad puede producir actividad química, así como efectos piezoeléctricos, termoeléctricos, fotoeléctricos y magnéticos. ☐ En electroquímica, la descomposición de las substancias químicas por medio de la corriente eléctrica, da lugar a electrólisis y a galvanoplastia. ☐ La electrólisis es la descomposición de un compuesto químico que se produce cuando una corriente pasa a través de una solución de este compuesto. ☐ La galvanoplastia es una aplicación de la electrólisis.

☐ Si se aplica un voltaje a ciertos cristales, se produe una fuerza piezoeléctrica y la presión ejercida por ella será tal que se deformará el cristal. ☐ Cuando la electricidad fluye a través de un mal conductor, se produce calor. ☐ Este efecto térmico se usa en tostadores, planchas, secadores eléctricos, etc. ☐ La corriente eléctrica, puede aprovecharse para producir luz. Esto se puede hacer produciendo mucho calor, como en la lámpara incandescente común, o bien poco calor, como en las aplicaciones de fluorescencia, fosforescencia y electroluminiscencia.

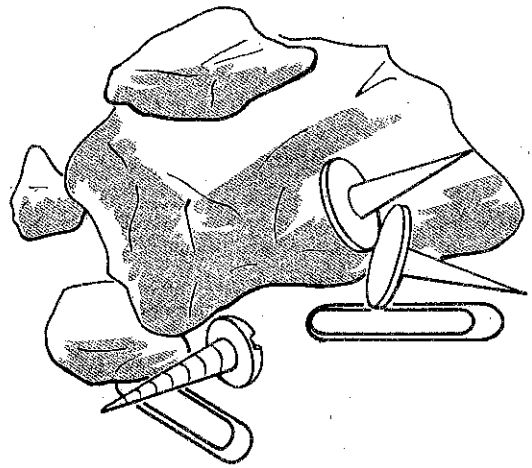
☐ La electroluminiscencia la producen gases y algunos materiales sólidos, cuando conducen corriente. En los anuncios de "neón" se usan gases como conductores. ☐ La fosforescencia aparece cuando la radiación o un haz de electrones incide sobre algunos fósforos o bien otros materiales especiales. El cinescopio de un televisor trabaja a base de este principio. ☐ En la fluorescencia se aplican la electroluminiscencia y la fosforescencia. ☐ Un gas, al ionizarse, emite radiación ultravioleta. La radiación incide sobre una capa fosforescente que emite luz "blanca". ☐ Cualquier conductor con corriente eléctrica se comporta como un imán. Esto se llama electromagnetismo.

preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son los cinco efectos producidos por la corriente eléctrica que se estudiaron en esta sección?
2. ¿Qué es galvanoplastia? ¿Cómo puede descomponerse en gases un líquido por medio de una corriente eléctrica?, ¿cómo se llama el fenómeno?
3. ¿Qué produce más calor, un conductor malo o uno bueno? Indique un metal en que se produzca mucho calor.
4. ¿Qué es incandescencia?
5. ¿Qué son electroluminiscencia y fosforescencia?
6. ¿En qué proceso se combinan electroluminiscencia y fosforescencia?
7. En los anuncios de "neón" se utilizan _____ como conductor.
8. ¿En qué difiere la incandescencia de otros efectos fotoeléctricos?
9. ¿Cuál es el principio en que se basa el funcionamiento de un audífono de cristal?, ¿en qué otro dispositivo se aplica el mismo principio?
10. ¿Cuál es la diferencia entre magnetoelectricidad y electromagnetismo?



La piedra imán es un imán natural descubierto por los griegos en Asia Menor, hace más de 2,000 años.

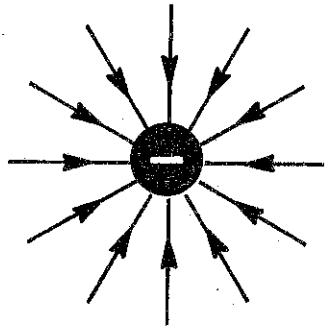


magnetismo

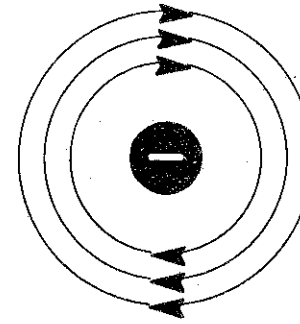
El magnetismo fue descubierto hace más de 2,000 años por los griegos, cuando observaron que el hierro atraía cierto tipo de piedras. Puesto que esta piedra se encontró por primera vez en la ciudad de Magnesia, en el Asia Menor, se le dio el nombre de *magnetita*. Más tarde, cuando se descubrió que esta piedra se alineaba espontáneamente en la dirección Norte a Sur al suspenderla de un cordel, se le llamó piedra de guía o imán. La magnetita constituye un *imán natural* que atrae a los materiales magnéticos.

el magnetismo y el electrón

Aunque hay una relación estrecha entre las fuerzas eléctricas y magnéticas, las dos son totalmente diferentes. Las fuerzas magnéticas y las fuerzas electrostáticas no tienen ningún efecto una sobre otra en tanto *no haya movimiento.* Pero, si el campo de fuerza de cualquiera de ellas se pone en movimiento, entonces sucede algo que origina la interacción de ambas fuerzas. Puesto que el electrón es la partícula más pequeña de la materia, se partió de ello para formular una teoría que explique la relación existente entre la electricidad y el magnetismo. Se trata de la *teoría electrónica del magnetismo.*

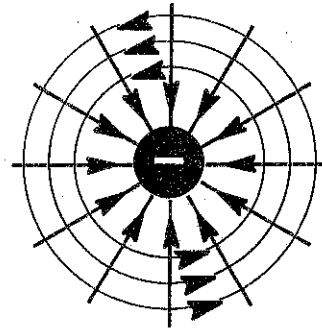


CAMPO ELECTROSTATICO



CAMPO MAGNETICO

CAMPO ELECTROMAGNETICO



Se sabe que el electrón tiene una carga negativa y que esta carga produce un campo de fuerza que está dirigido desde todas partes hacia el electrón. Por otra parte, según se estudia en física, una *carga en rotación* produce un *campo magnético.* Por consiguiente, debido a su rotación orbital, el electrón también tiene un campo magnético. Este campo se extiende en círculos concéntricos alrededor del electrón. Así pues, la líneas electrostáticas de fuerza y las líneas magnéticas de fuerza, al encontrarse en cualquier punto, son *perpendiculares* entre sí. Los dos campos combinados constituyen un *campo eelctromagnético.*

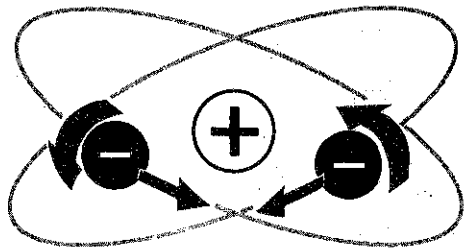
la molécula magnética

En realidad, los únicos metales naturalmente magnéticos son el hierro, el níquel y el cobalto. Por otra parte, puesto que todos los materiales contienen electrones, se podría preguntar por qué no todas las cosas tienen propiedades magnéticas. La respuesta es que en los átomos, los electrones orbitales que tienen un spin opuesto tienden a formar parejas, de modo que sus campos magnéticos se oponen, anulándose mutuamente. Lo anterior no quiere decir que los elementos que tienen un número impar de electrones sean magnéticos. Esto podría suceder, si se lograra aislar los átomos; pero, por lo general, los átomos, al combinarse para formar moléculas, se disponen de la manera más apropiada para tener, en total, 8 electrones de valencia y al hacerlo, en la mayor parte de los materiales, los spines de los electrones orbitales anulan los campos eléctricos.

Sin embargo, en el hierro, níquel y cobalto, este proceso no se realiza de una manera tan ordenada. Cuando los átomos de dichos metales se combinan, se convierten en iones y comparten sus electrones de valencia de tal modo que muchas de las órbitas de los electrones *no se anulan, sino que se suman.* Esto produce en el metal regiones llamadas *dominios magnéticos,* o *moléculas magnéticas.* Estas moléculas magnéticas se comportan como pequeños imanes.

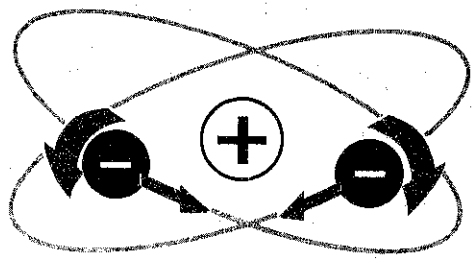
Aunque el hierro, el níquel y el cobalto son los únicos materiales naturalmente magnéticos, existen procesos controlados de fabricación para obtener compuestos con buenas propiedades magnéticas.

ATOMO NO MAGNETICO



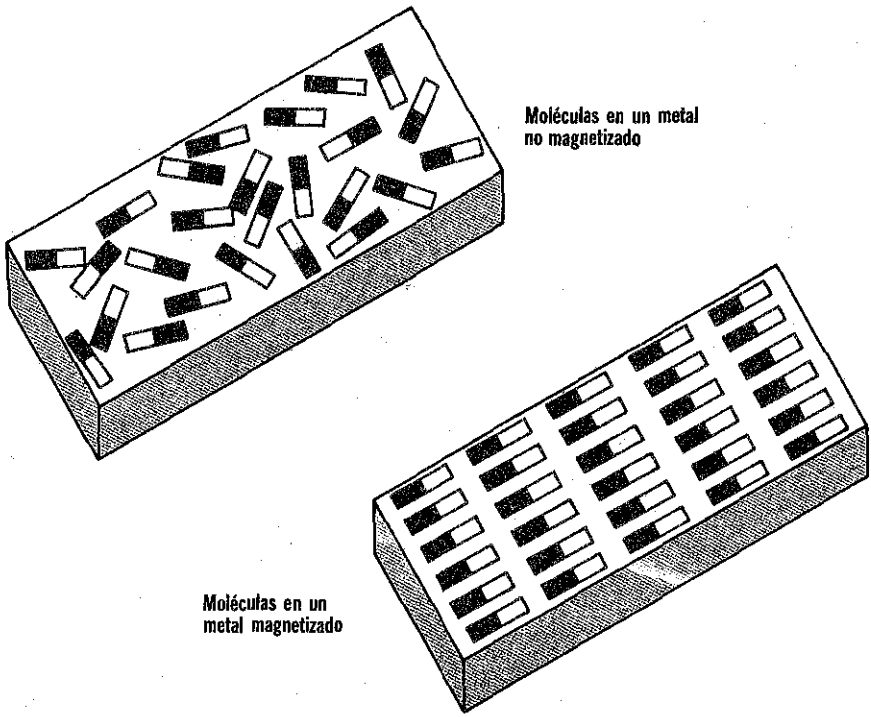
Los spines opuestos de esta pareja de electrones anulan sus efectos magnéticos.

En una molécula magnética los spines de los electrones que forman la pareja no son opuestos y la molécula tiene propiedades magnéticas.



materiales magnéticos

Los materiales naturalmente magnéticos reciben el nombre de *ferromagnéticos,* debido a que todos se comportan como el hierro, por lo que se refiere al magnetismo.



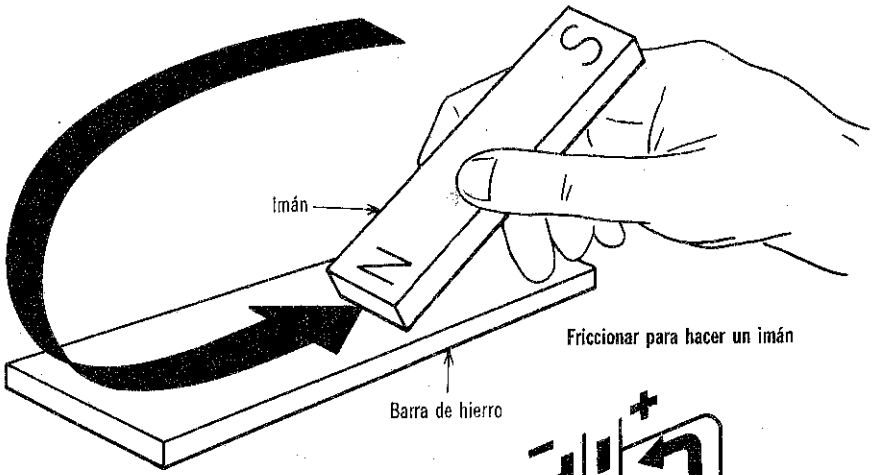
Puesto que los materiales magnéticos contienen moléculas magnéticas, podría pensarse que siempre se comportan como imanes. Sin embargo, no es el caso, porque en circunstancias normales, las moléculas magnéticas están dispersas y orientadas al azar, de manera que los campos magnéticos de las moléculas se anulan mutuamente. Se considera entonces que el metal está *desmagnetizado.*

Si todas las moléculas estuvieran dispuestas de manera tal que apuntaran en la *misma dirección,* los campos de fuerza *se sumarían.* El metal entonces se consideraría *magnetizado.* Si absolutamente *todas* las moléculas estuviesen alineadas, se produciría un campo magnético *intenso.* Pero si sólo *algunas* de las moléculas estuviesen alineadas, se produciría un campo magnético *débil.* Así pues, un material magnético puede ser *magnetizado parcialmente.*

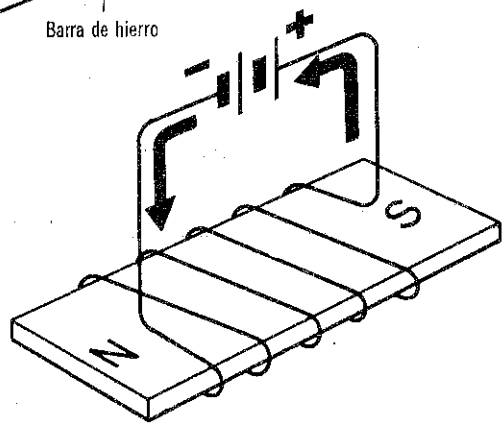
magnetización del hierro

Puesto que un material magnético se puede magnetizar *alineando sus moléculas,* la mejor forma de hacerlo es aplicando una fuerza magnética. La fuerza actuaría contra el campo magnético de cada molécula forzándola a alinearse. Esto se puede hacer de dos maneras: 1) por frotamiento magnético, y 2) por medio de una corriente eléctrica.

Cuando se pasa un imán por la superficie de una pieza de hierro no magnetizada, los campos del imán hacen que se alineen las moléculas, magnetizando al trozo de hierro.



Friccionar para hacer un imán



Uso de una corriente eléctrica para hacer un imán

Cuando se coloca un trozo de hierro desmagnetizado dentro de una bobina de alambre y se conecta el alambre de la bobina a una batería, la corriente eléctrica produce un campo magnético que magnetiza al hierro. Esto se explica más adelante.

Cuando un material magnetizado conserva su campo magnético por largo tiempo, se dice que es un *imán permanente.* Si pierde rápidamente su magnetismo, se le llama *imán temporal.* Con el hierro duro o el acero se hacen buenos imanes permanentes. El hierro dulce se usa para imanes temporales.

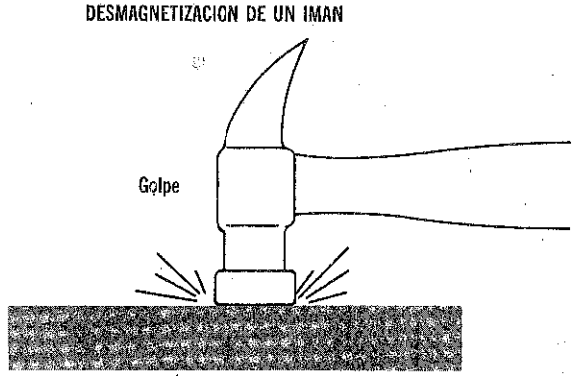
cómo se desmagnetiza un imán

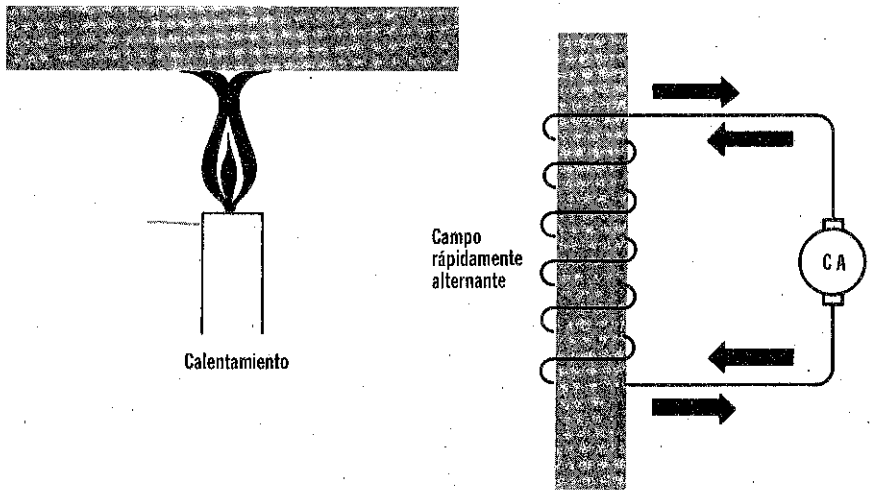
Para *desmagnetizar* un imán, las moléculas nuevamente deben quedar en *desorden* de manera que sus campos se anulen.

Si se golpea fuertemente el imán, la fuerza de la sacudida hará que las moléculas se reacomoden. A veces, se necesita dar varios golpes.

Si el imán se calienta, la *energía calorífica* hará que las moléculas vibren lo suficiente como para acomodarse en otra forma.

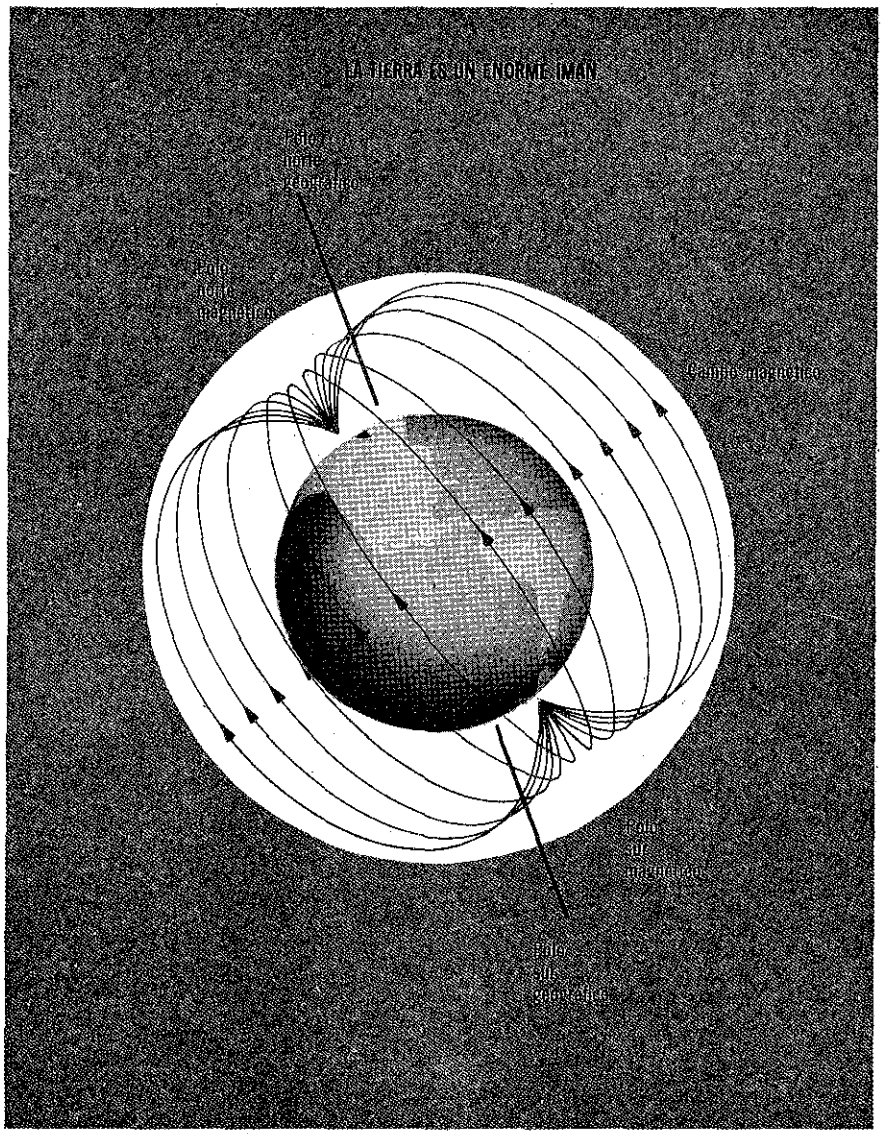
Si el imán se coloca en un *campo magnético* que *alterna* rápidamente, las moléculas pierden su orden, al tratar de seguir las variaciones de campo. Un campo rápidamente alternante se puede producir con corriente alterna. Este tema se trata en el volumen 3.





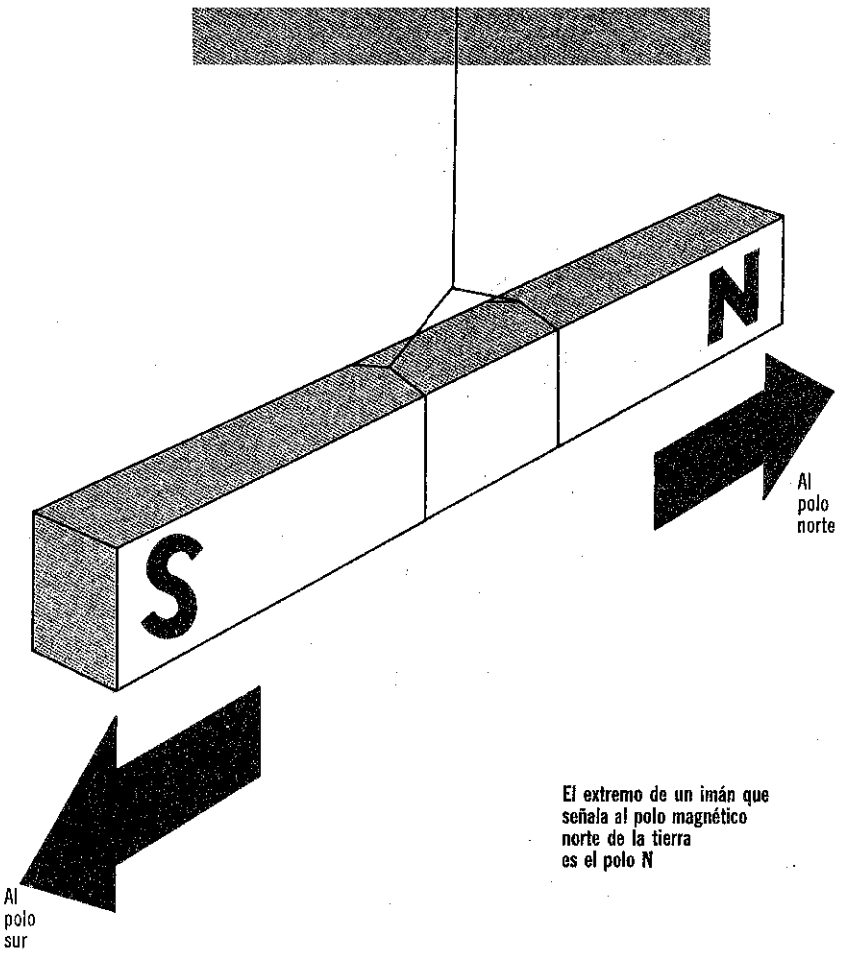
campo magnético terrestre

Puesto que la misma Tierra es una enorme masa giratoria, también produce un campo magnético. La Tierra se comporta como si tuviera un imán de barra que pasa por su centro, con un extremo cerca del polo geográfico norte y el otro cerca del polo sur.



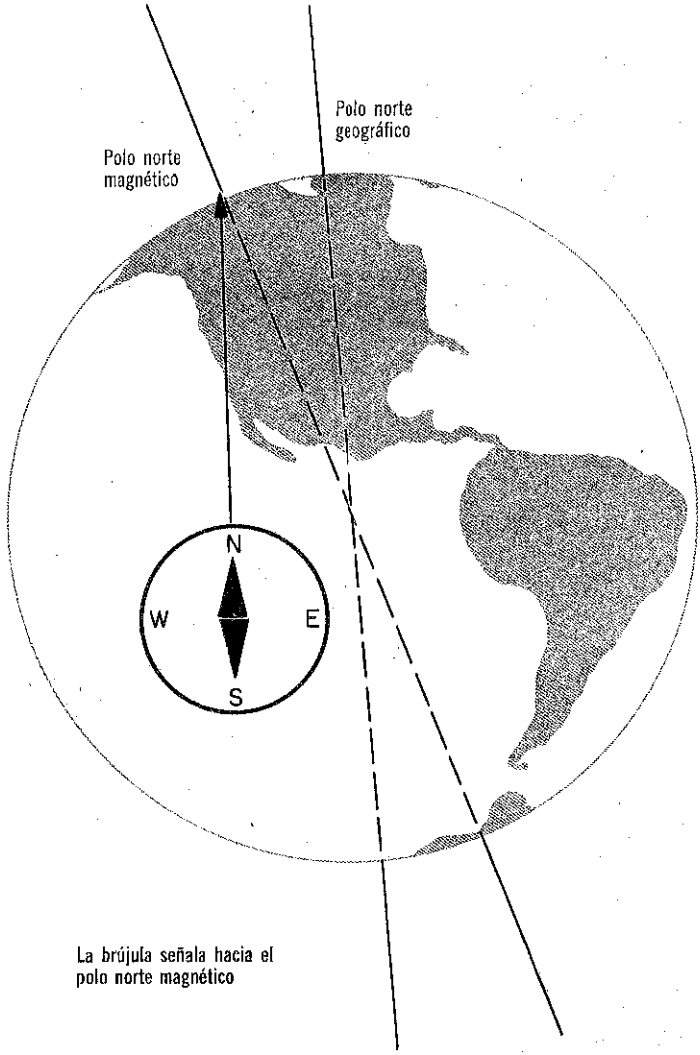
polaridades magnéticas

Para establecer reglas acerca de la forma en que un imán actúa sobre el otro se asignan *polaridades* a los extremos de los imanes. Las polaridades reciben el nombre de *norte* (N) y *sur* (S). El extremo norte de un imán se determina suspendiendo el imán de un cordel para que



El extremo de un imán que señala al polo magnético norte de la tierra es el polo N

gire libremente. Entonces el imán se alineará por sí mismo con el campo magnético terrestre. El extremo del imán que señale hacia el polo magnético norte de la Tierra es el polo N del imán. El otro extremo del imán recibe el nombre de polo S. El imán siempre se alineará en esta forma. La razón de esto se da más adelante.

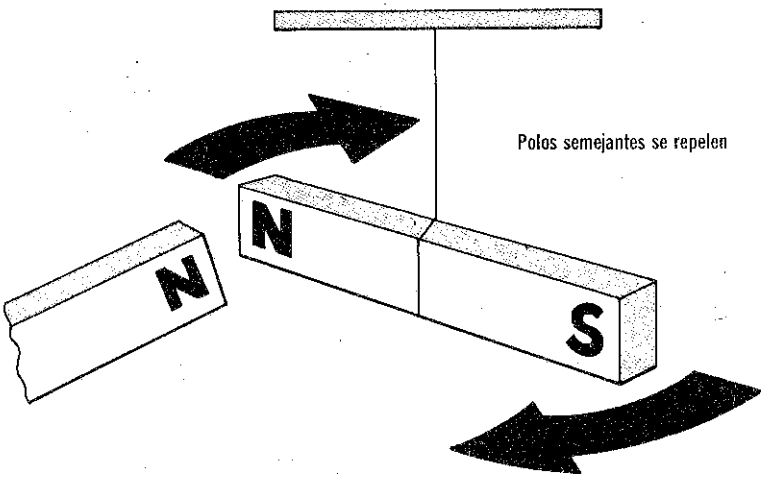


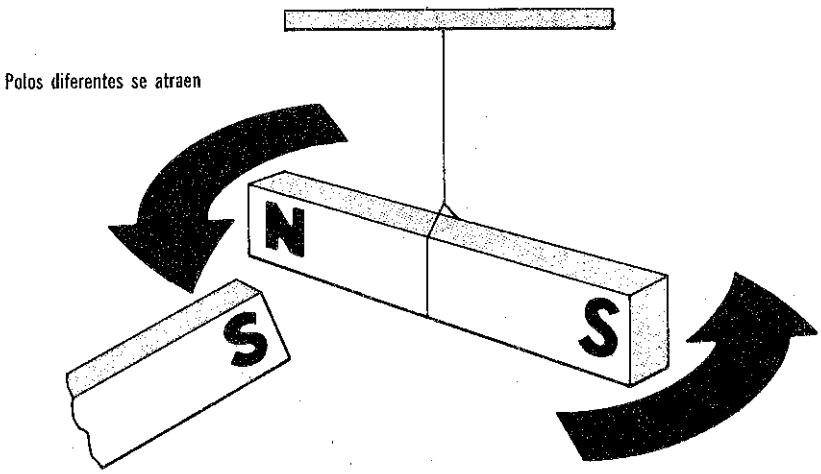
la brújula magnética

Puesto que un imán se alineará con el polo N hacia el norte, lo podemos usar para determinar direcciones. Una brújula consta de un pequeño imán ligero, que gira libremente y sin dificultad alguna se mantiene alineado con el polo norte magnético de la Tierra. Independientemente de cómo se haga girar la brújula, la aguja siempre señalará al Norte.

atracción y repulsión

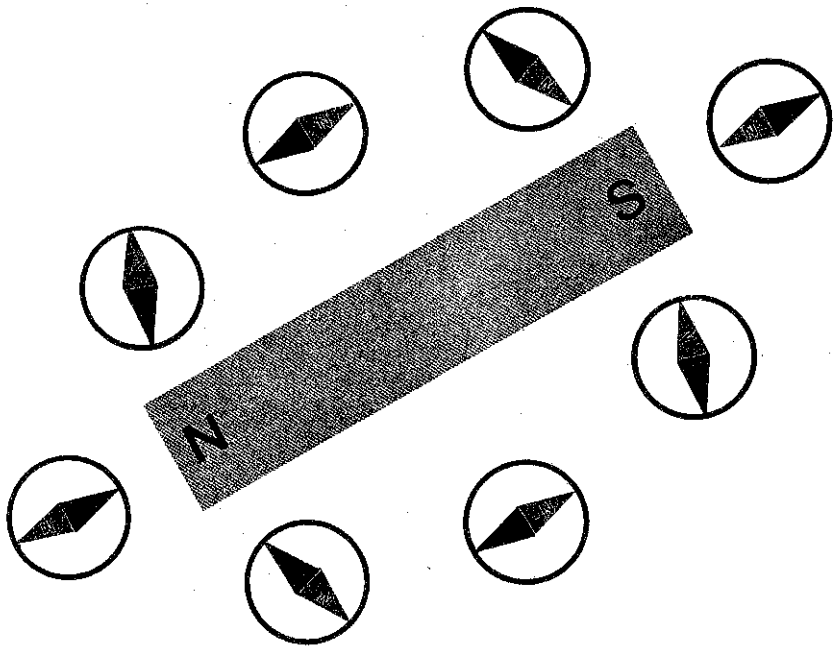
Puesto que un imán siempre se alinea con el polo norte magnético de la Tierra, se supone que existen ciertas leyes específicas que rigen los efectos magnéticos; éstas son las leyes de atracción y repulsión. Las leyes de atracción y repulsión que se aplican en el magnetismo son las mismas que las de las cargas eléctricas, excepto que se usan los conceptos de polaridades N y S en lugar de negativo y positivo. Las leyes son: *polos semejantes se repelen, polos distintos se atraen.*





campo magnético

Como puede verse por la atracción y repulsión de los polos magnéticos, existen fuerzas que se originan en los polos magnéticos y producen esos efectos, pero éstos no se producen solamente en los polos. La *fuerza* magnética, de hecho, rodea al imán, en un *campo*. Esto se puede comprobar cuando se hace mover una brújula alrededor de un imán de barra. En cualquier posición con respecto a la barra, un extremo de la aguja indicará hacia el polo opuesto de la barra.



La brújula muestra la fuerza magnética que rodea a un imán

Se puede usar la brújula para verificar la distancia a que se extiende el campo magnético del imán. Retirando lentamente la brújula, se llegará a un punto en el cual la aguja de la brújula ya no está sujeta a la influencia del campo magnético del imán, sino que nuevamente la atraerá al polo magnético norte de la Tierra.

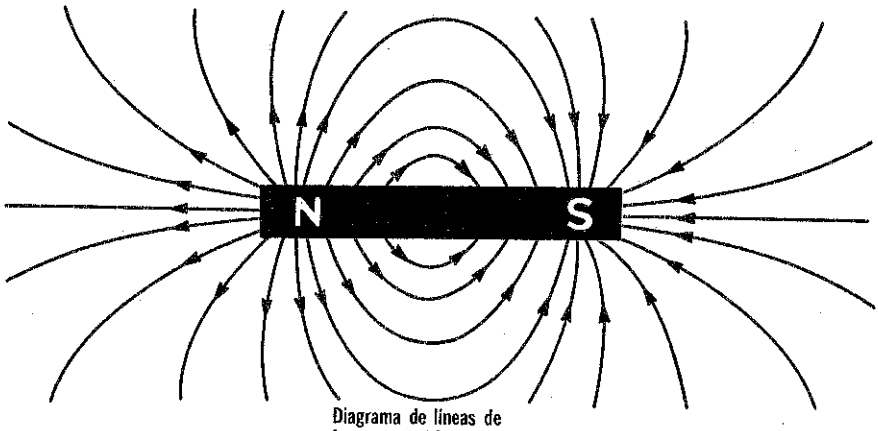
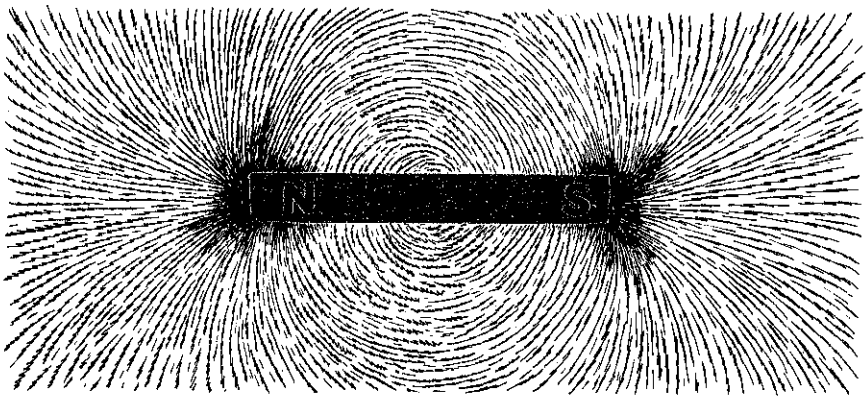


Diagrama de líneas de fuerza magnéticas

líneas de fuerza

El campo magnético de un imán está formado por *líneas de fuerza* que se extienden en el espacio partiendo del polo N del imán y dirigiéndose al polo S. Estas líneas de fuerza no se cruzan y se van apartando al alejarse del imán. Cuanto más cercanas sean las líneas de fuerza y sea mayor el número de ellas, más intenso será el campo magnético.

La existencia de las líneas de fuerza se puede demostrar rociando limaduras de hierro sobre una superficie plana y luego colocando un imán de barra sobre ellas. Las limaduras de hierro se orientarán siguiendo las líneas de fuerza y dan una imagen del campo magnético o espectro magnético. A las líneas de fuerza se les llama tambiénn *líneas de flujo.*



Las limaduras finas de hierro muestran las líneas de fuerza de una barra magnetizada

interacción de los campos magnéticos

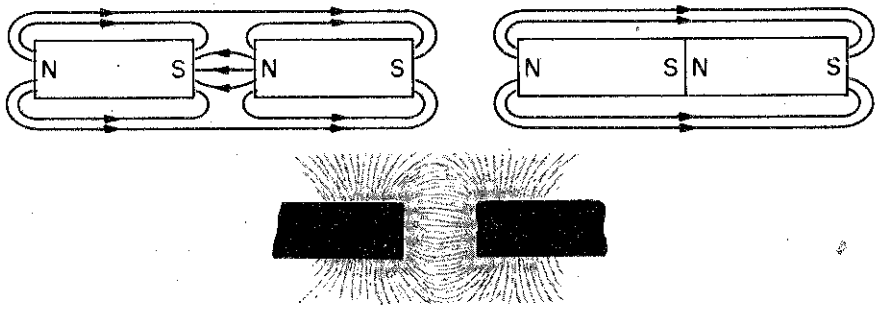
Cuando dos imanes se aproximan, sus campos actúan recíprocamente. Las líneas magnéticas de fuerza *no se cruzan*. Este hecho determina la forma en que habrán de actuar los campos entre sí.

Si las líneas de fuerza van hacia la *misma dirección*, se *atraerán* y se unirán al aproximarse. Por eso los polos diferentes se atraen.

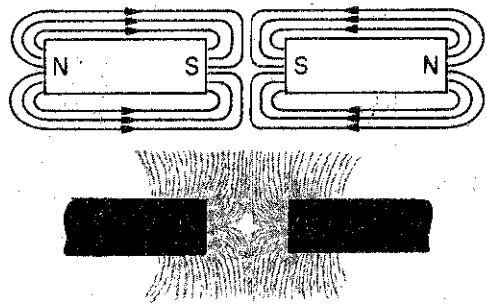
Si las líneas de fuerza van hacia *direcciones opuestas, no se pueden combinar*. Y, puesto que no se pueden cruzar, ejercen una fuerza opuesta entre sí. Por eso los polos semejantes se repelen.

La interacción de las líneas de flujo también se puede demostrar mediante limaduras de hierro.

Polos diferentes se atraen



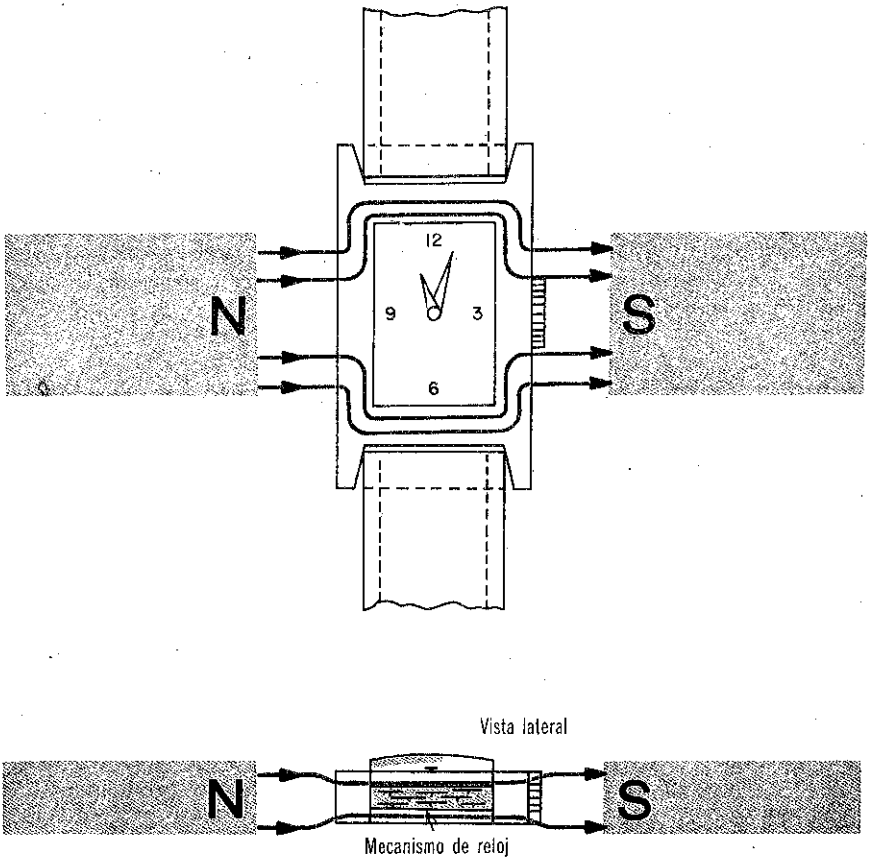
Polos semejantes se repelen



Las limaduras muestran las líneas de flujo

blindaje magnético

Las líneas de flujo magnético pueden pasar a través de todos los materiales, aun de los que no tienen propiedades magnéticas. No obstante, algunos materiales ofrecen cierta resistencia al paso de las líneas de fuerza. A esta propiedad se le llama *reluctancia*. Los materiales magnéticos tienen muy poca reluctancia a las líneas de flujo. Por consiguiente, las líneas de flujo tienden a pasar a través de un material magnético, aun cuando su trayectoria resulte más larga. Gracias a esta característica, los materiales magnéticos son útiles como blindaje para proteger los objetos encerrados en ellos contra las líneas de fuerza magnéticas. Por ello se utilizan en la fabricación de los relojes antimagnéticos.



Los materiales magnéticos se usan como blindaje para proteger un reloj de los campos magnéticos. El blindaje se magnetiza sólo temporalmente. Las líneas de flujo no pueden llegar a este mecanismo de reloj.

resumen

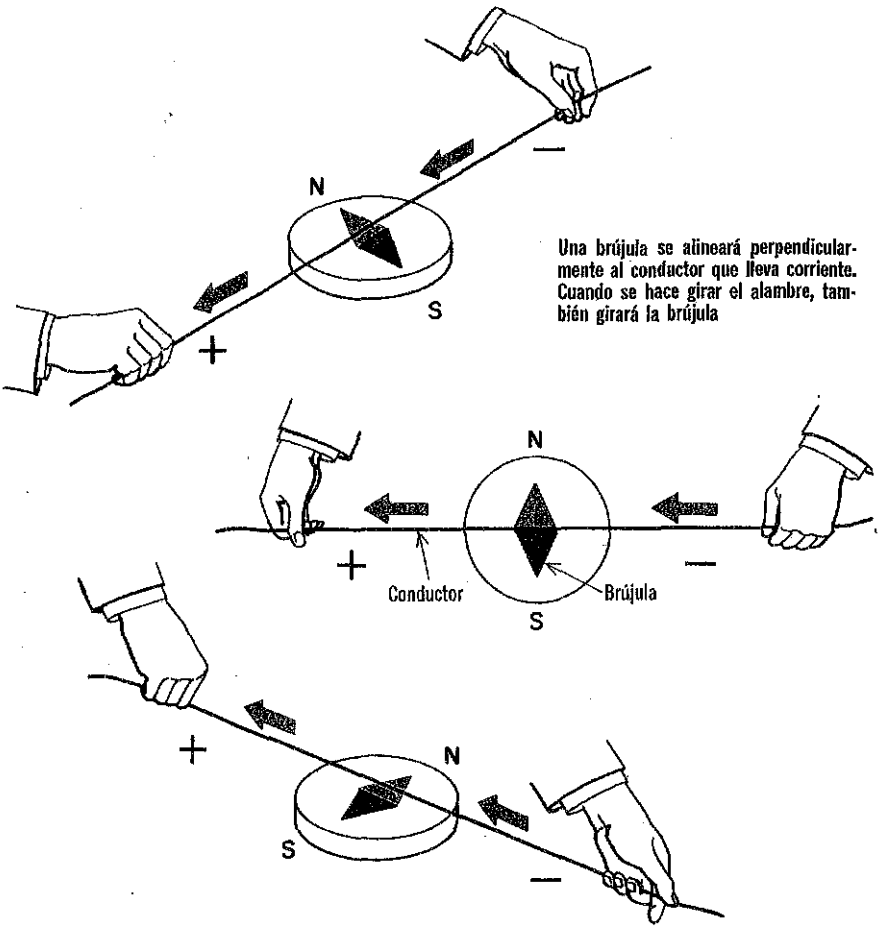
☐ La interacción de la electricidad y el magnetismo para formar un campo electromagnético se explica por la teoría electrónice del magnetismo. ☐ Los átomos de ciertos metales, al combinarse, tienden a compartir sus electrones de valencia de tal manera que forman moléculas o dominios magnéticos. Dichos metales son ejemplos de materiales magnéticos. ☐ Se dice de un material que tiene sus dominios o moléculas magnéticos alineados que está magnetizado. ☐ Un material magnético se puede magnetizar aplicando una fuerza magnética ya sea por frotamiento magnético o por medio de una corriente eléctrica. ☐ Un material magnético puede ser desmagnetizado aplicándole calor, golpeándolo o colocándolo en un campo magnético rápidamente alternado.

☐ La Tierra produce un campo magnético. ☐ A los imanes se les asignan polaridades norte (N) y sur (S). ☐ El polo N de un imán que puede girar libremente es aquel que señala hacia el polo norte de la Tierra. El otro polo es el polo S. La brújula es una aplicación de este principio. ☐ Las leyes de atracción y repulsión para imanes son: los polos semejantes se repelen, los polos distintos se atraen.

☐ La fuerza magnética forma un campo magnético alrededor del imán. ☐ El campo magnético está constituido por líneas de fuerza que se extienden en el espacio, partiendo del polo N del imán y volviendo al polo S. ☐ Las líneas de fuerza también se llaman líneas de flujo. ☐ Las líneas de fuerza no se cruzan. ☐ Cuanto más próximas estén las líneas de fuerza y mayor sea su número, más intenso serán el campo magnético. ☐ Las líneas de fuerza que tienen la misma dirección se atraen y juntan; esta es la razón por la que los polos diferentes se atraen. ☐ Las líneas de fuerza que van en direcciones opuestas se repelen y no se pueden combinar; por consiguiente los polos semejantes se repelen.

preguntas de repaso

1. ¿Qué son dominios magnéticos o moléculas magnéticas?
2. ¿Cómo se puede desmagnetizar un imán?
3. ¿Qué es un material ferromagnético?
4. ¿Qué significa la reluctancia de un material? ¿Por qué la reluctancia de un blindaje debe ser menor que la del material blindado?
5. ¿Qué es un campo electromagnético?
6. ¿Cómo puede magnetizarse un metal ferromagnético?
7. ¿Cuáles son las leyes de atracción y repulsión para los polos magnéticos?
8. ¿Qué son las líneas de flujo?
9. ¿Cuál es el polo de una brújula que señala hacia el polo norte terrestre?
10. ¿En qué consiste la diferencia entre los imanes permanentes y temporales?



¿qué es electromagnetismo?

Puesto que un electrón produce su propio campo magnético, debido al spin que tiene, se podría pensar que, al haber exceso de electrones en un objeto, se produciría un campo magnético. Sin embargo, también en el caso de cargas estáticas, los electrones con spines opuestos forman parejas, anulándose en este proceso sus efectos magnéticos. Por consiguiente, la electricidad estática no produce un campo magnético.

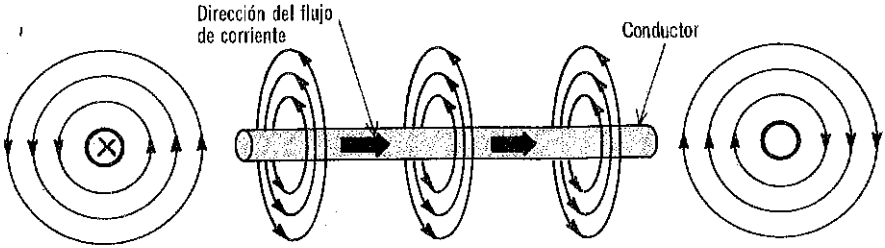
Por otra parte, los electrones que se mueven a lo largo de un conductor, sujetos a la fuerza que origina el *flujo de corriente*, no pueden formar parejas con los de spin opuesto. Por el contrario, como todos fluyen en la misma dirección, sus campos magnéticos tienden a sumarse.

En 1819, Hans Christian Oersted, al observar la forma en que un conductor con corriente influía en una brújula, descubrió que la corriente eléctrica produce un campo magnético.

electromagnetismo en un conductor

Puesto que el campo magnético de un electrón forma una trayectoria cerrada a su alrededor, los campos de los electrones se combinan para formar una serie de tales trayectorias alrededor del alambre. La dirección del campo magnético depende de la dirección del flujo de corriente. Al mover una brújula alrededor del alambre, ésta se alineará con las líneas de flujo.

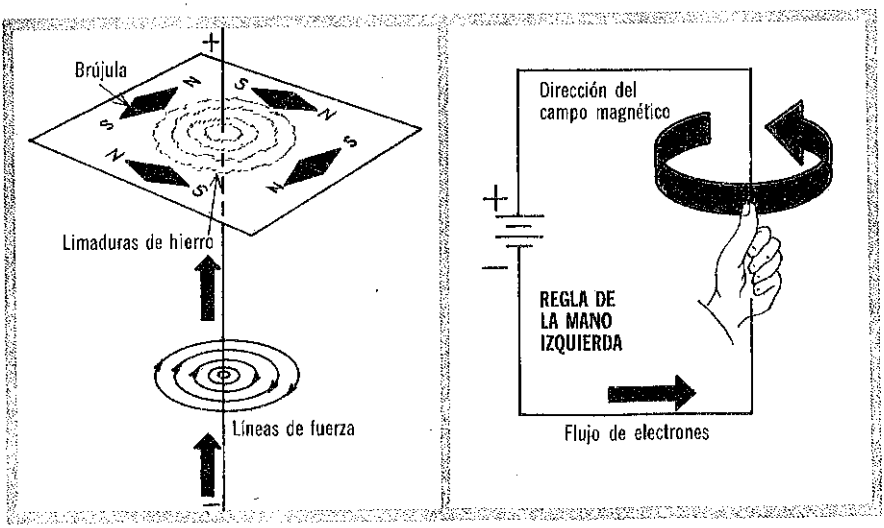
Se puede usar la *regla de la mano izquierda* para determinar la dirección del campo magnético. Si se cierran los dedos alrededor del conductor y el pulgar señala la dirección del flujo de la corriente eléctrica, entonces los dedos indicarán la dirección del campo magnético.



Sección transversal del conductor y campo magnético que muestra la corriente alejándose del lector

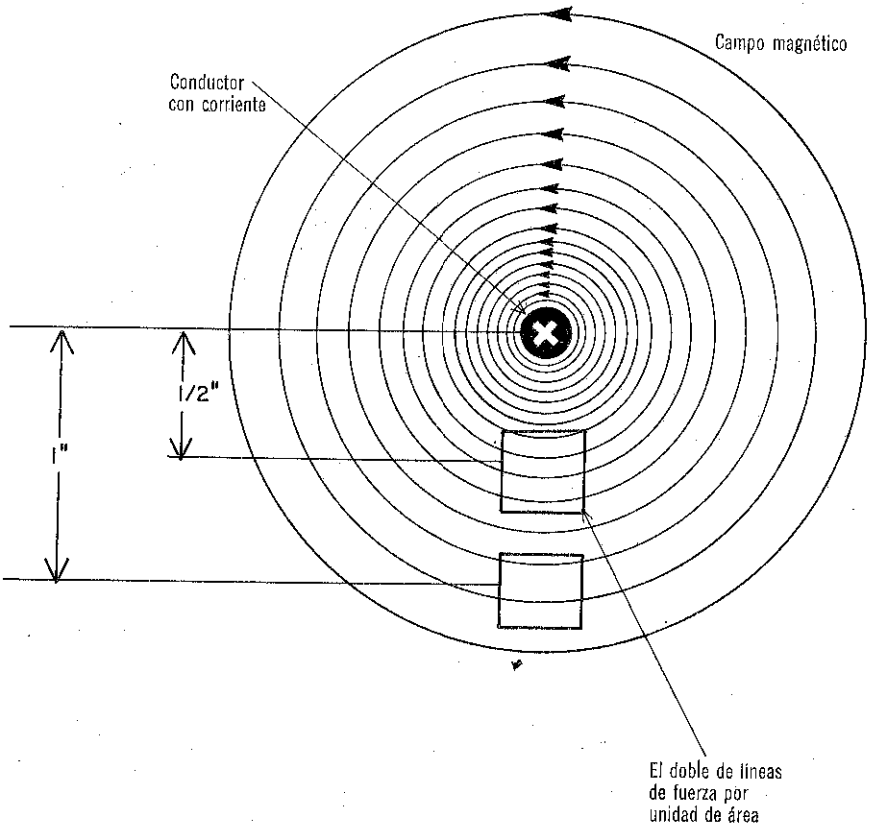
CAMPO MAGNETICO ALREDEDOR DE UN CONDUCTOR

Sección transversal del conductor y campo magnético; la corriente huye hacia el lector.



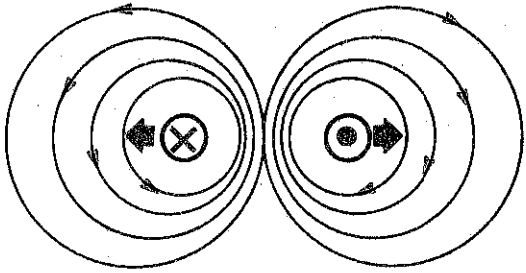
intensidad de campo

Cuanta más corriente pase por un conductor, más intenso será el campo magnético. Así como el campo magnético, las líneas de flujo son más densas cerca del del alambre y se apartan una de la otra al alejarse de éste. El campo, pues, es más intenso cerca del conductor y es más débil al aumentar la distancia.



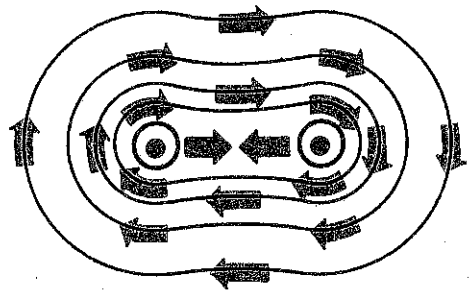
El número de líneas de fuerza por unidad de área disminuye en proporción inversa a la distancia al conductor. Por ejemplo, a un centímetro del conductor, la densidad de fuerza es la mitad de lo que sería a medio centímetro de distancia.

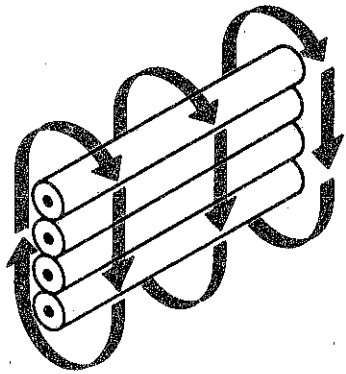
interacción de los campos magnéticos



Las corrientes opuestas producen campos opuestos que se repelen

Corrientes en la misma dirección, causan campos que se suman y atraen





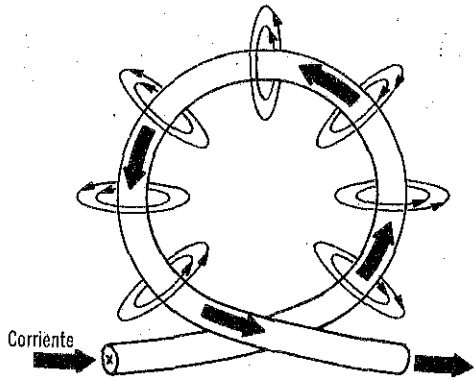
Pueden producirse campos más intensos combinando unos cuantos conductores

Si se aproximan dos conductores en los cuales la corriente fluye en direcciones opuestas sus campos magnéticos tenderán a oponerse entre sí, ya que las líneas de flujo van en direcciones opuestas. Las líneas de flujo no se pueden cruzar y los campos tienden a separar los conductores uno del otro.

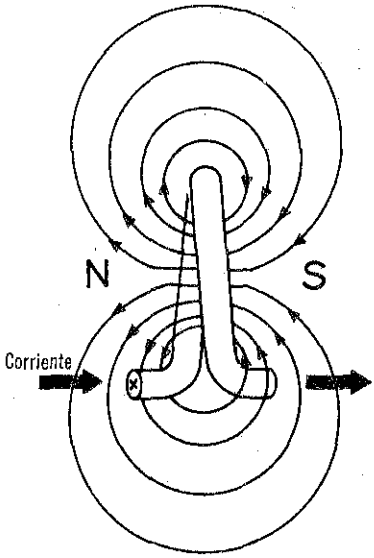
Cuando se aproximan dos conductores recorridos por corrientes que fluyen en la misma dirección, los campos magnéticos se suman, ya que las líneas de flujo llevan la misma dirección. Las líneas de flujo se unen y forman trayectorias cerradas alrededor de ambos conductores y los campos tienden a acercarlos. Las líneas de flujo de ambos conductores se suman para originar un campo magnético más intenso. Tres o cuatro conductores juntos en esta forma, originarían un campo magnético aún más intenso.

el electromagnetismo en una espira

Si el alambre se tuerce para formar una *espira,* los campos magnéticos producidos alrededor del conductor se orientarán de tal manera que todos entrarán en la espira por un lado y saldrán por el otro. En el centro de la espira las líneas de flujo se comprimen para crear un campo más denso y, por consiguiente, más intenso. Esto determina los polos magnéticos: el norte se encuentra en el lado del que salen las líneas de flujo y el sur en el lado por el que entran.



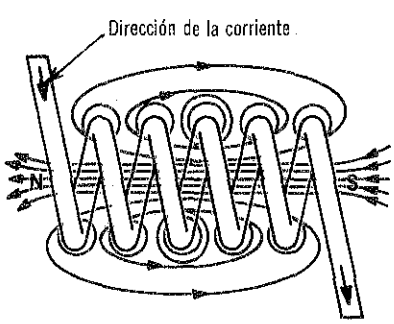
Cuando se forma una espira con un conductor, todos los campos circulares entran en un lado de la espira y salen del otro lado

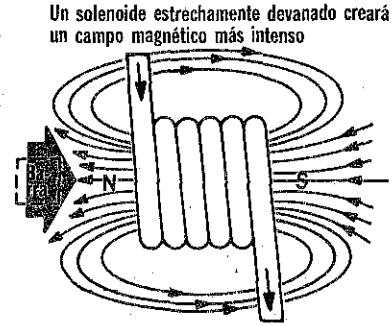


Las líneas de flujo se comprimen en el centro de la espira para crear un campo intenso. El polo N se produce en el lado del que salen las líneas de flujo

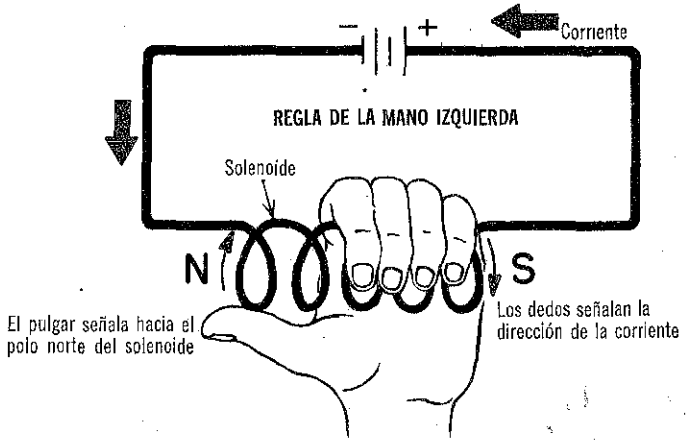
electromagnetismo en una bobina

Si se devanan numerosas espiras en la misma dirección para formar una *bobina*, habrá más campos y las líneas de flujo en la bobina serán mucho más densas. El campo magnético en la bobina se vuelve muy intenso. Cuantas más espiras se tengan, más intenso será el campo magnético. Si la bobina se comprime ligeramente, los campos se juntarán aún más para formar un *electroimán* fortísimo.





Una barra de hierro será atraída hacia adentro de una bobina solenoide.

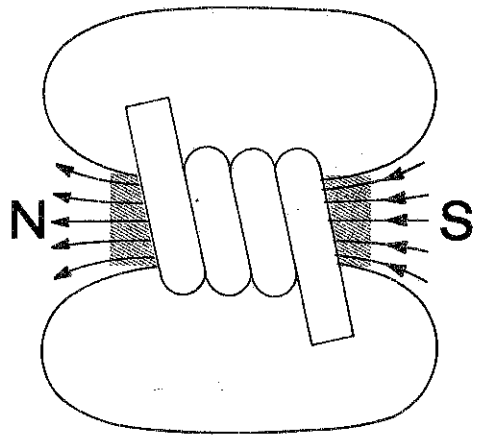


Para producir un campo magnético intenso se utiliza una bobina devanada helicoidalmente que recibe el nombre de *solenoide*. Las líneas de flujo en un solenoide actúan en la misma forma que un imán. Salen del polo N, y dan la vuelta para entrar al polo S. Cuando un solenoide atrae a una barra de hierro, tiende a introducir la barra *dentro* de la bobina.

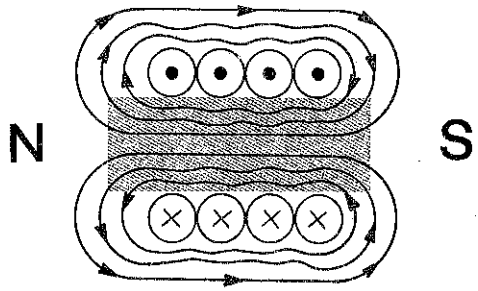
La *regla de la mano izquierda*, también se aplica a los solenoides. Si los dedos se cierran sobre las espiras del solenoide, apuntando en la dirección del flujo de la corriente electrónica, el pulgar señalará hacia el polo N.

el núcleo magnético

El campo magnético en una bobina que se puede hacer más intenso aún si se introduce un *núcleo de hierro* dentro del embobinado. Puesto que el hierro dulce es magnético y su *reluctancia* es baja, habrá mayor



Con un núcleo de hierro aumenta la densidad del campo magnético.



La sección transversal de la bobina muestra el campo magnético alrededor del conductor

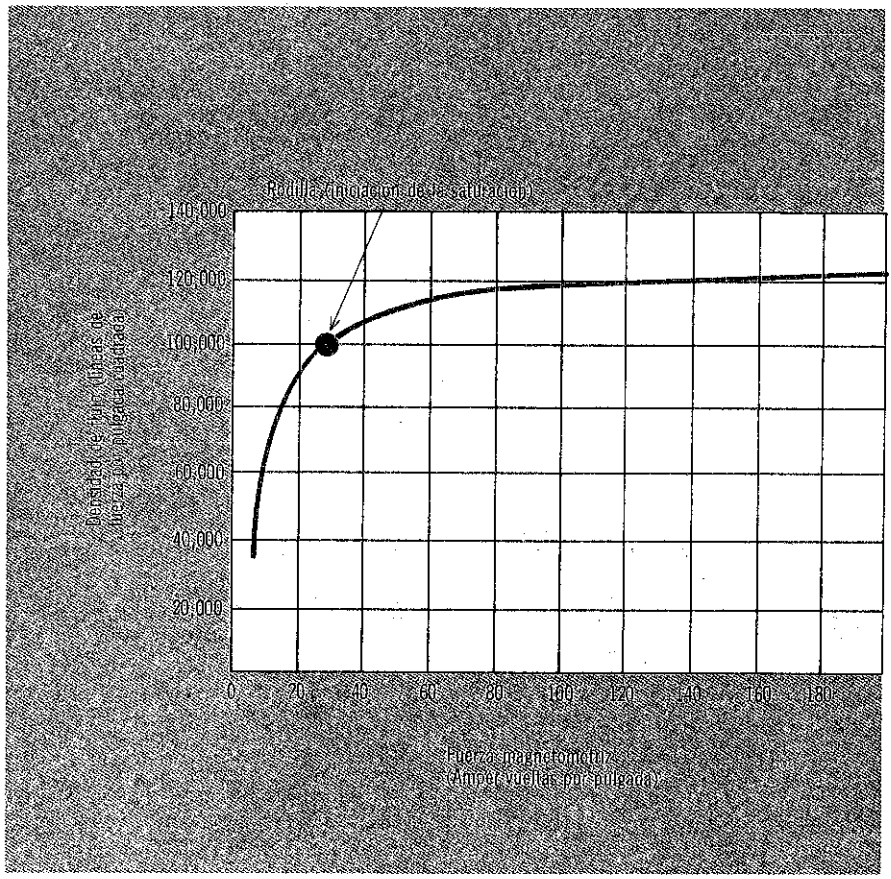
concentración de líneas de flujo en él que en el aire. Cuantas más líneas de flujo haya, más intenso será el campo magnético.

El hierro dulce es el apropiado para el núcleo de un electroimán, pues el hierro duro se magnetizaría en forma permanente.

fuerza magnetomotriz

La fuerza magnetizante originada por la corriente que pasa por un conductor recibe el nombre de *fuerza magnetomotriz* (fmm). La fmm depende de la corriente que pase por la bobina y del número de espiras en la bobina. Si la corriente se duplica, también se duplicará la fmm. Además, si se aumenta el número de espiras en la bobina, también aumentará la fmm.

Por tanto, para medir la fmm se usa la unidad llamada amper-vuelta que es la corriente eléctrica multiplicada por el número de vueltas de la bobina.



La magnitud de la fmm determina el número de líneas de flujo que existirá en el campo o la intensidad de ese campo. Al aumentar la fmm, también aumenta el número de líneas de flujo. Pero se llegará a un punto en el cual la fmm, al aumentar, ya no producirá más líneas de flujo. A este punto se le conoce como *punto de saturación.*

resumen

☐ Los electrones producen campos magnéticos así como electrostáticos, sin embargo, por lo general, unos electrones anulan los efectos magnéticos de otros. ☐ Los electrones que se mueven a través de un conductor por efecto del flujo de una corriente, producen un campo magnético debido a que se agregan los campos de los electrones. ☐ La dirección del campo magnético depende de la dirección del flujo de corriente, según la regla de la mano izquierda: si se cierran los dedos sobre el conductor y el pulgar señala la dirección del flujo de la corriente eléctrica, entonces los dedos indicarán la dirección del campo magnético. ☐ Cuanto más intensa sea la corriente eléctrica, más intensa será el campo magnético. ☐ El campo es más intenso cerca del conductor y se debilita al aumentar la distancia.

☐ Los campos de dos conductores que llevan corriente, interactúan, uno con el otro. ☐ Si las corrientes son de la misma dirección, los conductores se atraen entre sí; si son de direcciones opuestas se repelen. ☐ Una espira de alambre con corriente tiene un campo concentrado en su centro. ☐ Muchas espiras se pueden devanar helicoidalmente para formar un electroimán. Ese electroimán recibe el nombre de bobina o solenoide. ☐ La regla de la mano izquierda para un solenoide da la dirección de los polos; si se cierran los dedos sobre el conductor, apuntando en la dirección del flujo de la corriente eléctrica, el pulgar señalará al polo N.

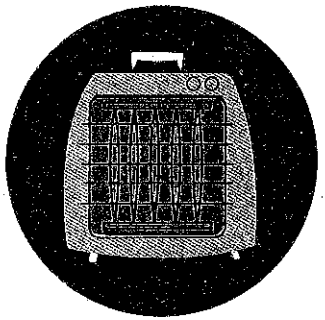
☐ Los núcleos de hierro dulce se usan para concentrar e intensificar las líneas de flujo. ☐ La fuerza magnetizante originada por la corriente que fluye en un alambre recibe el nombre de fuerza magnetomotriz, o fmm. ☐ El amper-vuelta es la unidad de fmm. Es igual al número de espiras o vueltas del alambre multiplicado por la corriente con amperes. ☐ Cuando una fmm al creciente llega al punto en que ya no aumenta el número de líneas de flujo, se dice que la bobina está saturada.

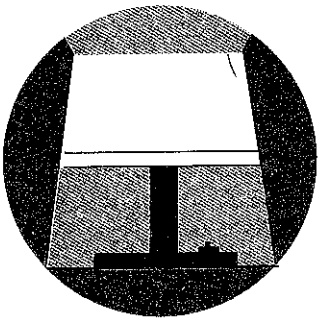
preguntas de repaso

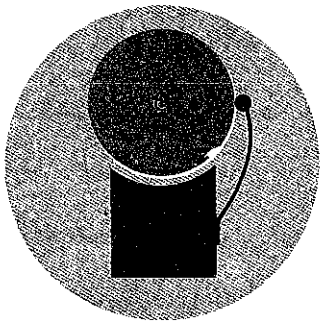
1. ¿Con qué regla puede determinarse la dirección del campo magnético alrededor de un conductor con corriente?
2. ¿Cómo influye en la magnitud del campo la magnitud de la corriente?
3. ¿Cómo varía el número de líneas de fuerza según la distancia?
4. ¿Qué sucede cuando se aproximan dos conductores con corriente?
5. ¿Qué es una bobina o solenoide? ¿Qué efecto tiene en el campo magnético?
6. Enunciar la regla de la mano izquierda para los solenoides.
7. ¿Por qué se insertan núcleos en los electroimanes? ¿A veces se usan los núcleos de acero?
8. Comparar el comportamiento de los electroimanes con el de los imanes ordinarios.
9. ¿Qué es fuerza magnetomotriz y cómo se mide?
10. ¿Qué se entiende por punto de saturación?

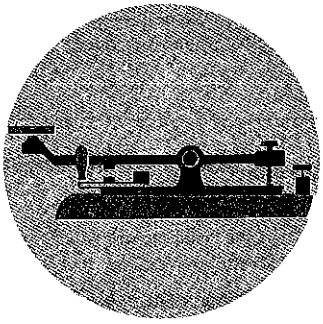
la electricidad y el magnetismo como fuentes de energía

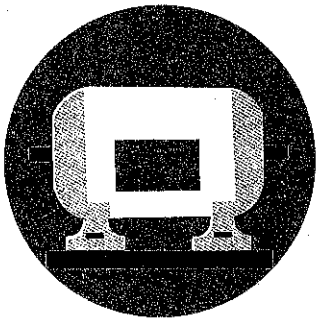
Debido a los diversos efectos que tiene la electricidad, así como la forma en que se relaciona con el magnetismo, estos dos tipos de energía se pueden aplicar de muchas formas, para realizar un trabajo útil.

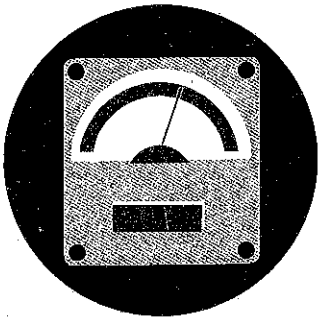


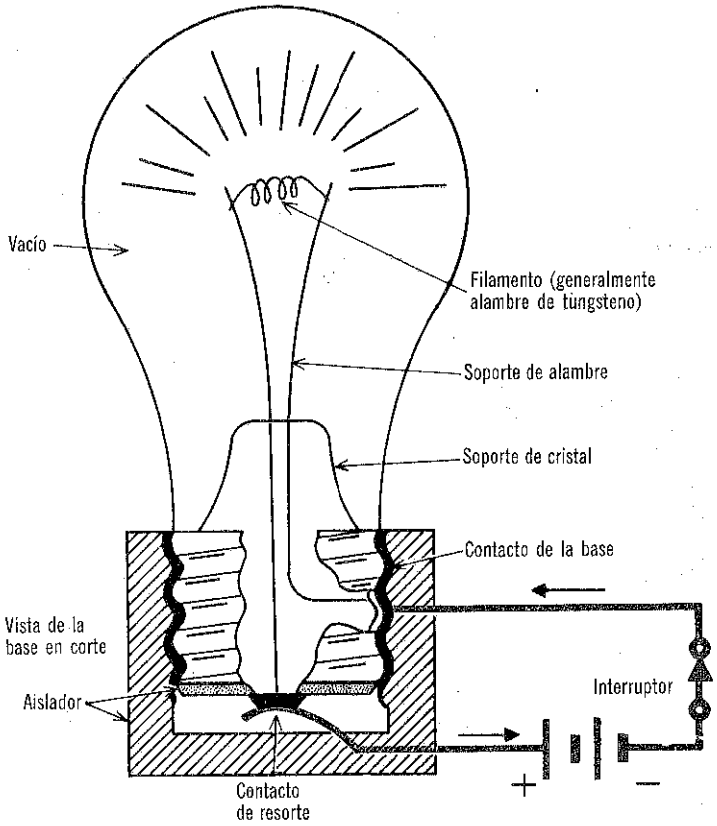












la luz incandescente

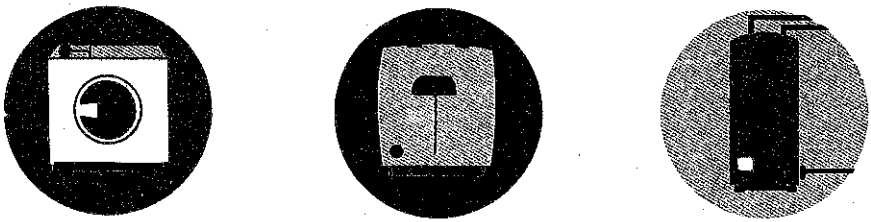
Como se ha explicado antes, la lámpara incandescendente emite luz, porque la electricidad que pasa por un mal conductor lo calienta hasta que éste adquiera un brillo rojo o rojo blanco. Este mal conductor cuando está dentro del bulbo se llama *filamento* y generalmente está hecho de alambre de tungsteno.

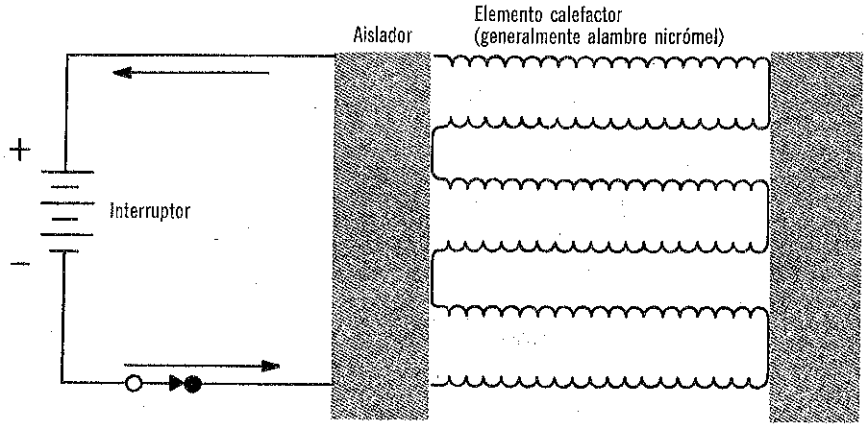
El filamento está sostenido por dos soportes de alambre que pasan a través de un pedestal de vidrio a la base. Un alambre pasa al casquillo de latón roscado y el otro va de un botón metálico que está debajo. El casquillo roscado y el botón son buenos conductores y se encuentran separados por un aislante.

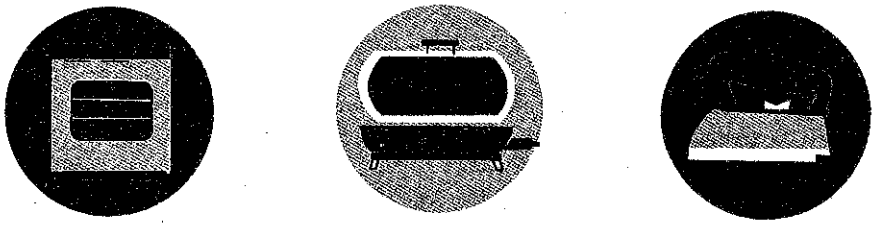
Cuando se cierra el interruptor el circuito está completo. La corriente de electrones va del lado negativo de la batería a través del interruptor y el contacto de la base y llega hasta un soporte del alambre. La corriente pasa entonces a través del filamento y a través del otro soporte al botón, y, luego, a través del contacto del resorte al lado positivo de la batería.

No hay aire en el bulbo para evitar que el filamento se queme.

el calentador eléctrico







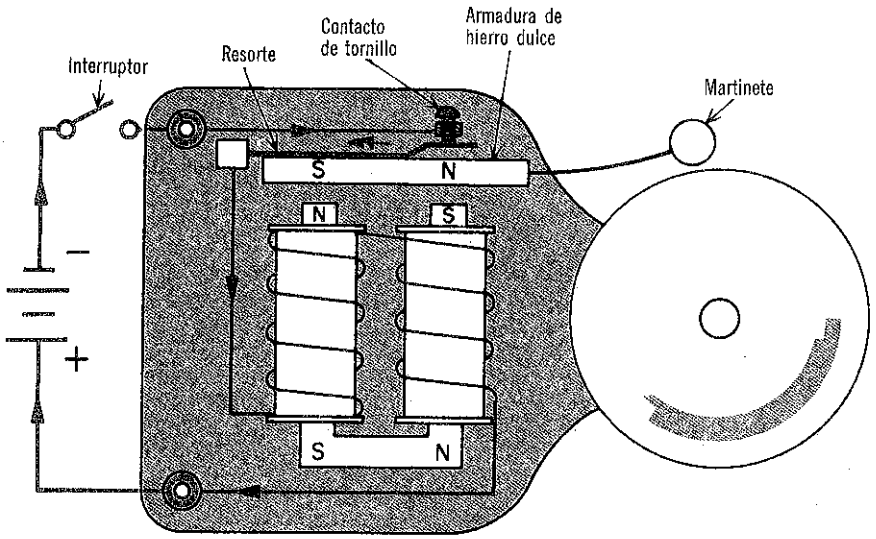
El calentador eléctrico está construido en forma similar al bulbo de luz incandescente, excepto que el material usado para el cemento calefactor no necesita brillar con la misma intensidad. Cuando se cierra el interruptor, la corriente de la batería pasa a través del elemento calefactor, aumentando su temperatura. Generalmente se puede observar un brillo rojo suave y se siente que se calienta al aire circundante. El elemento calefactor, que generalmente es alambre nicrómel, está sostenido por piezas aislantes.

Las secadoras eléctricas de ropa, calentadores de agua, estufas, planchas, tostadores, parrillas, etc., funcionan en forma similar.

el timbre electromagnético

En el timbre electromagnético, se aprovecha la acción de un campo magnético para hacer vibrar una *armadura* de manera que el martinete del timbre golpea repetidamente la campana.

Cuando se cierra el interruptor, la batería envía corriente eléctrica a través de un contacto de tornillo a un resorte. Luego, la córriente pasa a través de un conductor y a través de dos bobinas electromagnéticas antes de pasar al lado positivo de la batería. Cuando los electroimanes se magnetizan, atraen la armadura hacia abajo para que el martinete golpee la campana.



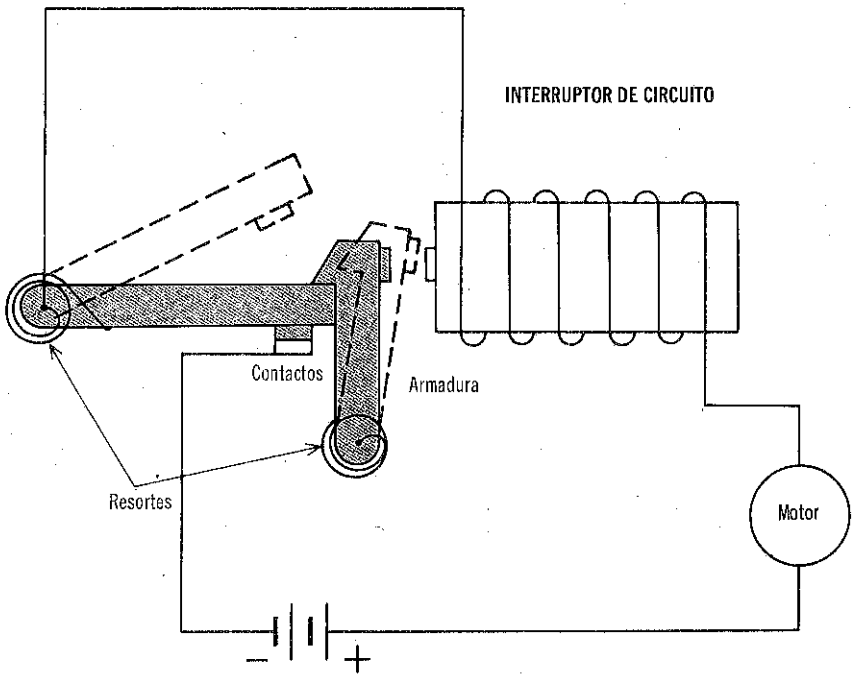
Sin embargo, cuando la armadura golpea, el resorte se aleja del contacto del tornillo. Esto abre el circuito. La corriente cesa y los electroimanes se desenergizan. Ya no atraen la armadura y el resorte tira de la armadura para colocarla de nuevo en su lugar. Pero esto hace que el contacto del resorte y el tornillo cierren nuevamente el circuito, de modo que se repite el proceso. Los electroimanes se energizan y se desenergizan en rápida secuencia, haciendo que la armadura vibre hacia arriba y hacia abajo. El martinete también vibra y golpea repetidamente a la campana.

El zumbador electromagnético funciona de manera similar. Sin embargo, no tiene martinete ni campana. En lugar de éstos tiene una armadura que vibra contra los electroimanes, produciendo zumbidos.

el interruptor electromagnético

El interruptor electromagnético se usa para proteger los circuitos contra cortos o *sobrecargas*, tal como lo hace un fusible. Sólo que el fusible se quema, en tanto que el interruptor se *dispara*, y, por consiguiente, uno puede *reponerlo* y usarlo nuevamente.

En condiciones normales, el flujo de corriente de la batería pasa a través de contactos que se mantienen cerrados mediante la acción de una armadura. Entonces la corriente pasa a través de un electroimán al motor y regresa a la batería. En tanto que la corriente que pasa no sea excesiva, el campo originado por el imán no tiene suficiente intensidad como para atraer la armadura.



Pero cuando fluye demasiada corriente, por ejemplo, si el motor se pega o está en corto, el campo magnético será muy intenso y tirará de la armadura. Debido a esto, el resorte acciona la barra de contacto, abriéndose los contactos. Así se abre el circuito. El imán se desmagnetiza y suelta la armadura; pero la barra de contacto queda retirada ya por el resorte. Después de corregir la falla, puede restablecerse la posición del interruptor para usarlo nuevamente.

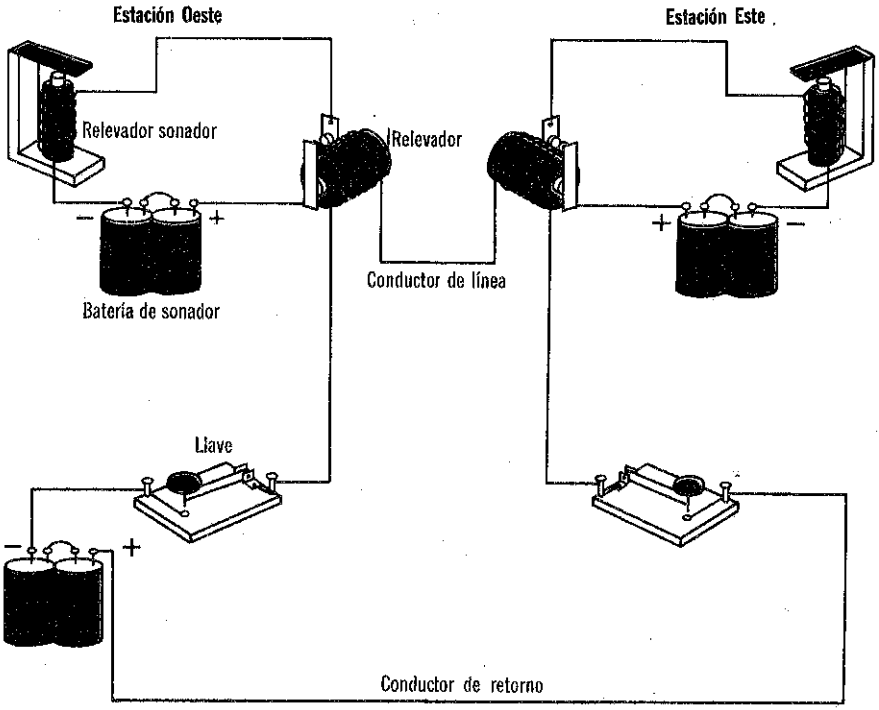
Un electroimán que acciona una armadura para abrir o cerrar contactos, también se conoce como *revelador* o *relé*.

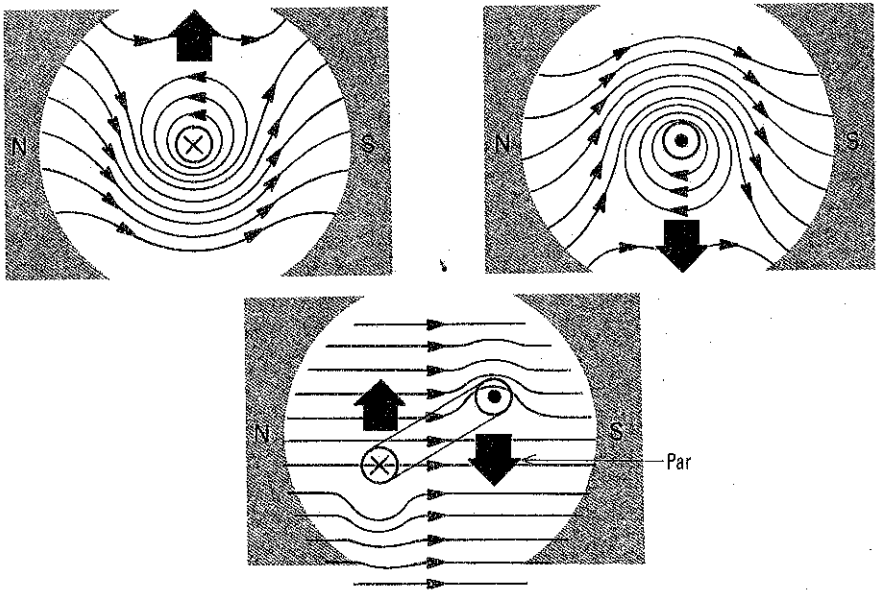
el aparato telegráfico básico

El diagrama que aparece más adelante muestra la forma en que trabaja un sistema telegráfico básico. Los *manipuladores* o llaves de los aparatos funcionan como interruptores que abren y cierran el circuito para transmitir puntos y raya o guión.

Si la estación "oriente" desea recibir de la estación "poniente" debe mantener cerrada su llave. Luego, cuando el telegrafista de la estación poniente opera su llave, la corriente pasará a través de los relevadores y los magnetizará. Los relevadores cerrarán los contactos de sus armaduras para conectar las baterías a los relevadores correspondientes. Las armaduras de los reveladores vibrarán cuando sean energizados de igual forma que el zumbador descrito previamente. Si la llave de la estación poniente se oprime por un tiempo *breve*, envía un *punto*; pero si dicha llave está cerrada más tiempo, envía un *guión*. Pero los relevadores trabajan juntos, de manera que la estación poniente también puede oír lo que *transmite*.

Cuando la estación oriente desea enviar un mensaje, abre su llave para abrir todo el circuito. Luego, cuando la estación poniente nota que no se oye el zumbido, sabe que la estación oriente desea transmitir; la estación poniente entonces cierra su llave y escucha.





el motor eléctrico

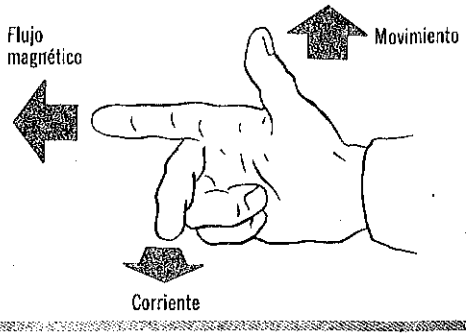
El motor eléctrico trabaja debido al efecto que tiene un campo magnético sobre un conductor con corriente eléctrica. La corriente que fluye en el conductor produce un campo magnético propio alrededor del conductor. Este campo distorsionará las líneas de flujo que existen entre dos polos magnéticos. En la región donde las líneas de flujo tienen la misma dirección que las líneas de fuerza, las primeras tienden a desplazarse hacia un lado del conductor. Pero las líneas distorsionadas de flujo tienden a enderezarse, de modo que ejercen una fuerza de repulsión sobre el conductor. Por lo tanto, en la región donde las líneas de flujo son más débiles, empujan el conductor hacia afuera del campo. En este principio se basa el funcionamiento del motor eléctrico. Para encontrar la dirección en que se moverá el conductor, se puede usar la *regla de la mano derecha.*

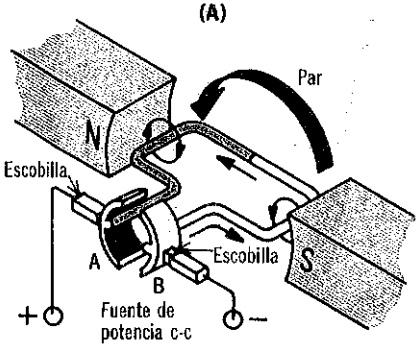
Si se conecta una espira de alambre a través de un conmutador a una batería, la corriente en el alambre producirá campos magnéticos que serán repelidos por las líneas de flujo magnético. Debido a esto, la espira de alambre gira, con lo que produce un *par.* Cuando la espira toma la posición mostrada en B en la página 1-97, la fuerza de repulsión cesa, pero la inercia hace que el alambre siga moviéndose a la posición C, donde la repulsión del campo la hace girar nuevamente. El conmutador es necesario para evitar que la espira cuando llegue a la posición B y la pase, sea repelida de nuevo a la posición A. Pero los segmentos del conmutador están partidos en ese punto de manera que la corriente a través de ese alambre se invierte y el alambre es repelido en la dirección anterior. El rotor (o armadura) en este tipo de motor tiene muchas espiras de alambre y muchos segmentos de conmutador. Los motores se estudian en el volumen 7.

motor eléctrico (cont.)

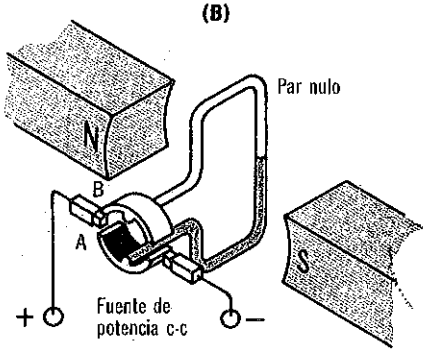
REGLA DE LA MANO DERECHA

Para determinar la dirección en la que se moverá un conductor con corriente dentro de un campo magnético, úsese la regla, del motor, o de la mano derecha. Apuntar el dedo índice en la dirección del campo magnético y el dedo medio en la dirección del flujo de la corriente. El pulgar indicará la dirección del movimiento

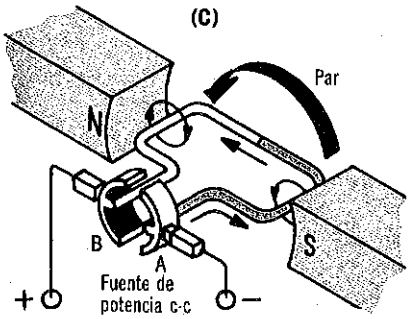




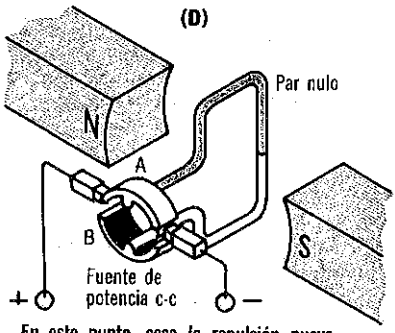
La corriente en un conductor produce un campo que repele a la espira, con un par



En este punto, cesa la repulsión del campo, pero la inercia lleva la espira hacia el diagrama (C)



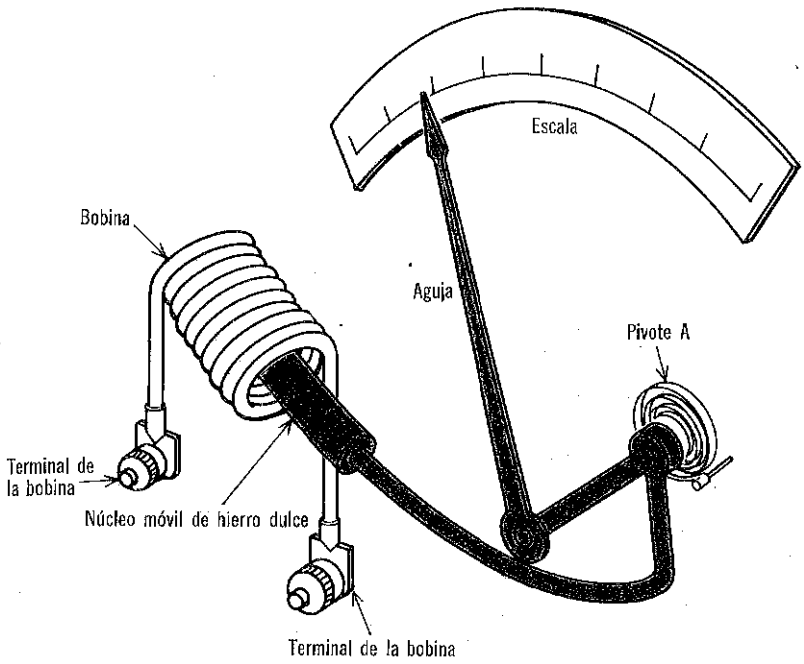
Al continuar girando la espira, el conmutador invierte la dirección de la corriente de manera que el campo magnético repele al conductor en la misma dirección



En este punto, cesa la repulsión nuevamente, pero la inercia lleva la espira hacia la posición A, para repetir el ciclo

el instrumento de medición

Un instrumento de medición básico es el que tiene una bobina solenoide y un núcleo móvil y se usa para medir el flujo de corriente. Siempre que fluye corriente a través de una bobina, se establece un campo magnético que atrae al núcleo hacia afuera. Sin embargo, en el otro extremo del núcleo hay un pivote con un resorte que tiende a mante-



La corriente en la bobina produce un campo magnético que atrae al núcleo y hace moverse a la aguja. Mientras mayor sea la corriente en la bobina, más intenso será el campo magnetico, y mayor será la atracción del núcleo a la bobina, para hacer desplazarse más la aguja.

nerlo en su lugar. La distancia que se mueve el núcleo depende de la intensidad del campo magnético; y la intensidad del campo está determinada por la corriente que fluye a través de la bobina. Por lo tanto, el núcleo se interna más en la bobina cuanto mayor sea la corriente.

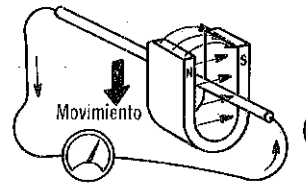
Además, el pivote del núcleo tiene una aguja que gira sobre una escala para indicar la corriente que se desea medir. Los instrumentos de medición se examinan en el volumen 5.

el generador básico

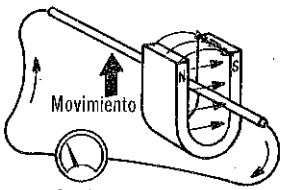
El funcionamiento del generador es parecido pero contrario al del motor. En lugar de introducir una corriente en los devanados del rotor para producir un campo magnético, el rotor se hace *girar mecánicamente*, generalmente mediante un motor.

Entonces, cuando los devanados del rotor pasan a través de las líneas de flujo, la energía magnética origina corriente en el alambre. Cuando el alambre pasa por el campo, la corriente fluye en una dirección; pero cuando el alambre tiene la dirección opuesta, la corriente fluirá también en dirección opuesta. Sin embargo, el conmutador hace el cambio de conductores fuera del generador en tanto gira el rotor, para asegurar que el flujo de corriente a través del instrumento tenga la *misma dirección* en todo momento. Por lo tanto, un generador de este tipo se llama de *corriente continua* (c. c.), o corriente directa. Si el conmutador no se usa, la corriente saliente del generador cambiará de dirección al girar la espira. A esto se le llama corriente alterna (c. a.). Esta se estudia en el volumen 3.

Se induce corriente en un conductor que se mueve a través de un campo magnético. La dirección del flujo de corriente depende de la dirección en que se mueva un conductor

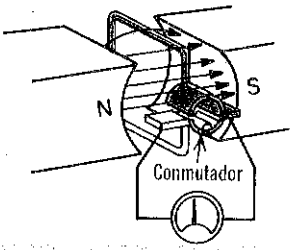


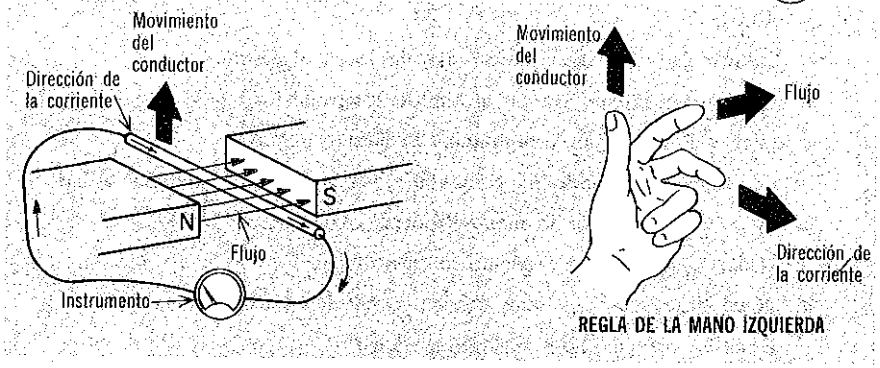
Conductor en movimiento descendente



Conductor en movimiento ascendente

El conmutador mantiene la corriente que sale del generador, en la misma dirección en todo momento





Se puede usar la *regla de la mano izquierda* para generadores, con objeto de determinar la dirección que tendrá el flujo de corriente, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético.

Los generadores se examinan detalladamente

resumen

☐ Algunas aplicaciones de la energía eléctrica son: la lámpara incandescente y el calentador eléctrico. ☐ La lámpara incandescente emite luz cuando pasa una corriente a través de un mal conductor. El conductor o filamento generalmente está hecho de tungsteno. ☐ El calentador eléctrico funciona de acuerdo con el mismo principio que la lámpara incandescente; pero el elemento calefactor no brilla con la misma intensidad. El elemento calefactor generalmente el nicrómel. ☐ Otros dispositivos que usan elementos calefactores son: planchas, tostadores, parrillas, etcétera.

☐ Algunas aplicaciones de la energía magnética son: el timbre electromagnético, el relevador, el sistema telegráfico básico y el motor eléctrico. ☐ El timbre electromagnético aprovecha la acción de un campo magnético para hacer vibrar una armadura de manera que un martinete golpee sobre una campana. ☐ Un relevador es un electroimán que abre o cierra contactos. ☐ Un sistema telegráfico básico consiste de llaves que funcionan como interruptores pues, por medio del relevador, abren y cierran el circuito para transmitir puntos y rayas. ☐ El motor eléctrico opera debido al efecto de un campo magnético sobre un alambre que lleva corriente. La interacción causa la rotación de una armadura. La regla de la mano derecha para motor da la dirección que habrá de seguir la rotación del rotor.

☐ El instrumento básico de medición tiene una bobina solenoide para atraer un núcleo móvil y así medir la corriente. ☐ El generador básico produce electricidad. Su operación es opuesta a la del motor. La regla de la mano izquierda para el generador, indica la dirección de la corriente generada.

preguntas de repaso

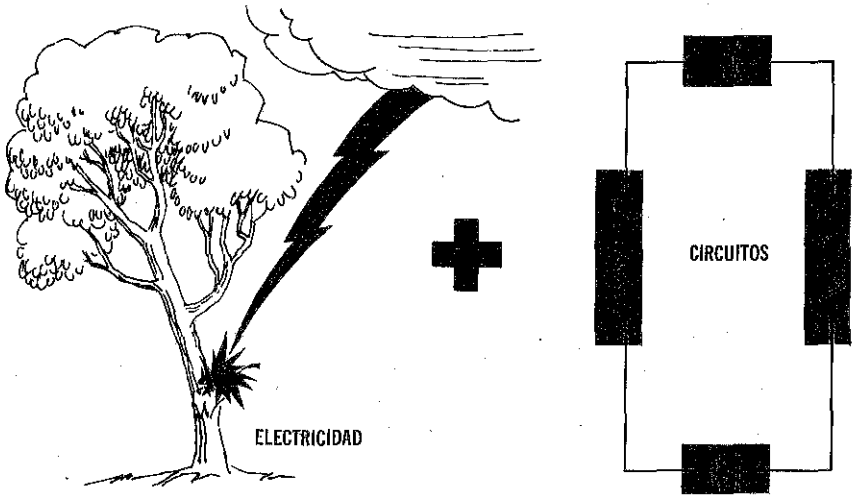
1. ¿En qué forma difiere una lámpara incandescente de un calentador eléctrico?
2. Enuncie la regla de la mano derecha para el motor.
3. ¿Qué presentan en común el timbre electromagnético y el zumbador?
4. ¿Por qué se usa un conmutador en ciertos motores?
5. ¿Es siempre necesario un conmutador para que un generador trabaje?
6. Enuncie la regla de la mano izquierda para el generador.
7. ¿Cómo puede medir corriente un instrumento?
8. ¿Qué diferencia hay entre corriente continua y corriente alterna?
9. Describa un conjunto telegráfico básico.
10. ¿Qué diferencia hay entre un interruptor magnético y un fusible?

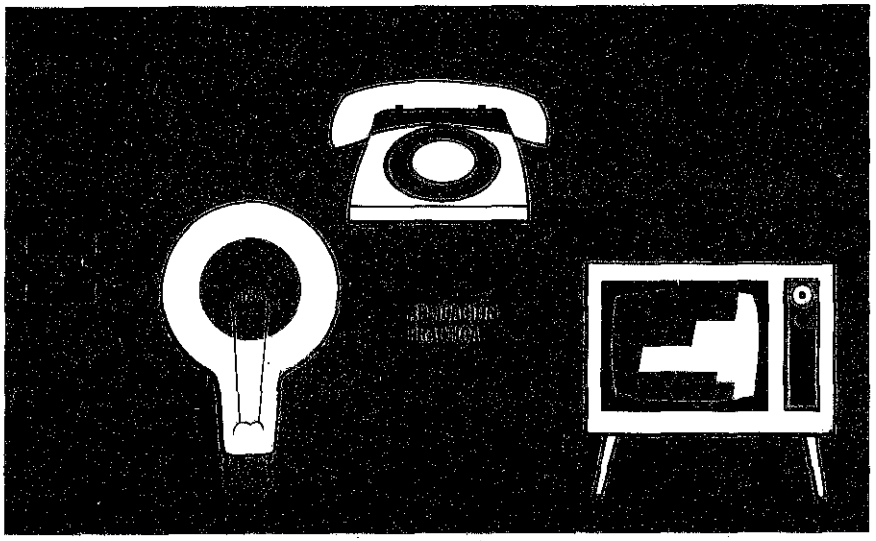
2

El circuito eléctrico — Resistencia — Resistores — Ley de Ohm — Potencia — Circuitos en serie — Circuitos en paralelo — Comparación de circuitos en serie y en paralelo — Circuitos en serie-paralelo — Leyes de Kirchhoff — Principio de superposición — Resistencia interna de las fuentes de energía — Fallas en los circuitos de C.C.

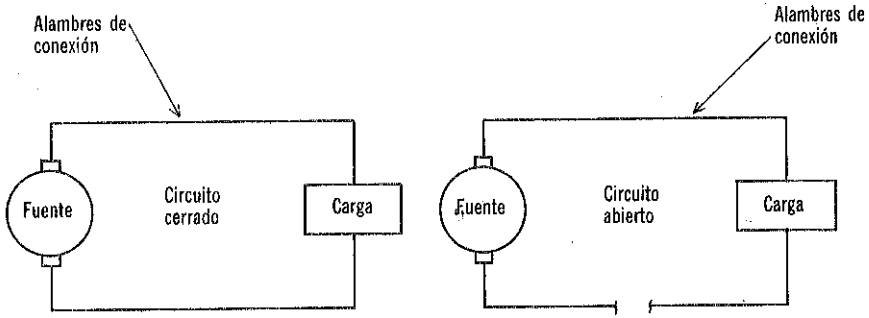
usos de la electricidad

Por sí misma, la electricidad no es más que un fenómeno interesante. Para aprovecharla en algún uso práctico, debe hacérsele que desempeñe algún trabajo o función. Generalmente, esto requiere controlar la electricidad y, con frecuencia, convertirla en otras formas de energía. El medio físico para lograr esta transición de fenómeno a aplicación práctica es el *circuito eléctrico.*





Son necesarios tres elementos para tener un circuito eléctrico



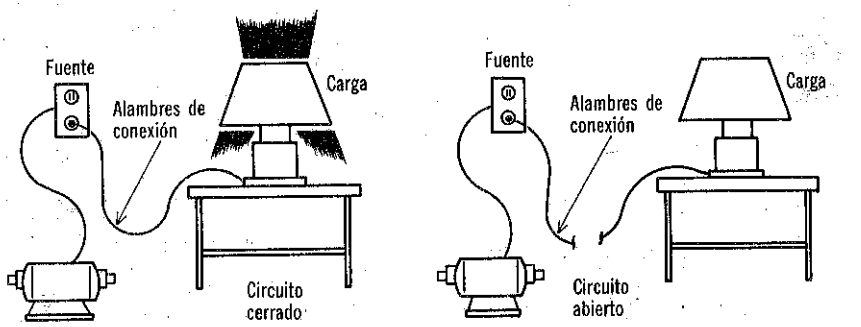
Es necesaria una trayectoria completa para que pueda circular corriente

el circuito eléctrico

Básicamente, un circuito eléctrico consta de 1) una fuente de energía; 2) alambres o conductores de conexión, y 3) un dispositivo que aproveche la energía eléctrica de la fuente para lograr algún objetivo. Este dispositivo que hace aprovechable a la energía recibe el nombre de *carga*.

Para que la corriente fluya en un circuito eléctrico, debe haber un conducto completo, es decir, ininterrumpido, que salga de la terminal negativa de la fuente de energía, pase por los alambres de conexión y la carga, y que luego regrese a la terminal positiva de la fuente. Si no hay tal conducto, la corriente no fluirá y, entonces, el circuito se llama circuito abierto.

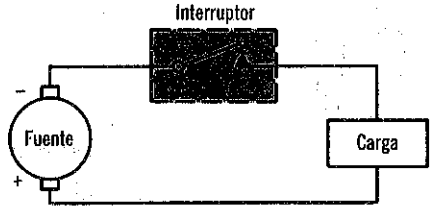
La carga es un dispositivo que usa energía eléctrica



Es necesaria una trayectoria completa para que pueda circular corriente

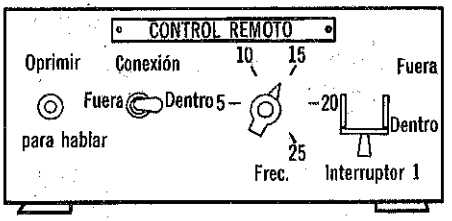
el interruptor

Un circuito eléctrico debe constar de un conducto completo para que la corriente fluya solamente cuando se necesita energía eléctrica en la carga. En cualquier otro caso, el circuito se mantiene "abierto", y entonces no hay flujo de corriente.

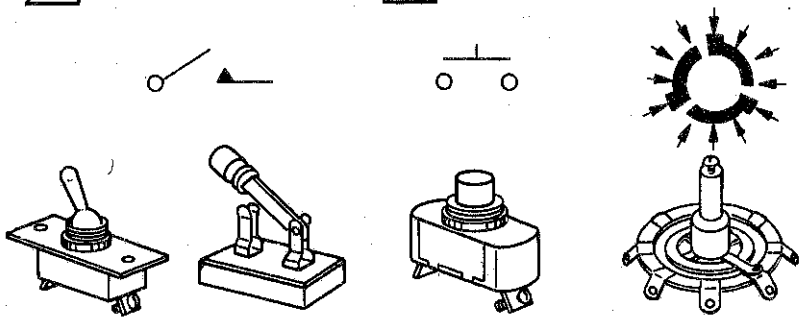


Todos los interruptores desarrollan la misma función básica de abrir y cerrar circuitos eléctricos

La apertura y cierre de un circuito eléctrico normalmente se efectúa por medio de un interruptor (*switch*). En su forma más sencilla, un interruptor consta de dos piezas de metal conductor que se conectan a los conductores del circuito. Estas dos piezas de metal están dispuestas de manera que sea fácil hacer que se toquen o se separen. Cuando se tocan, se establece un conducto completo para el flujo de la corriente y se tiene un circuito cerrado. Cuando se separan, no puede fluir corriente y el circuito queda abierto.



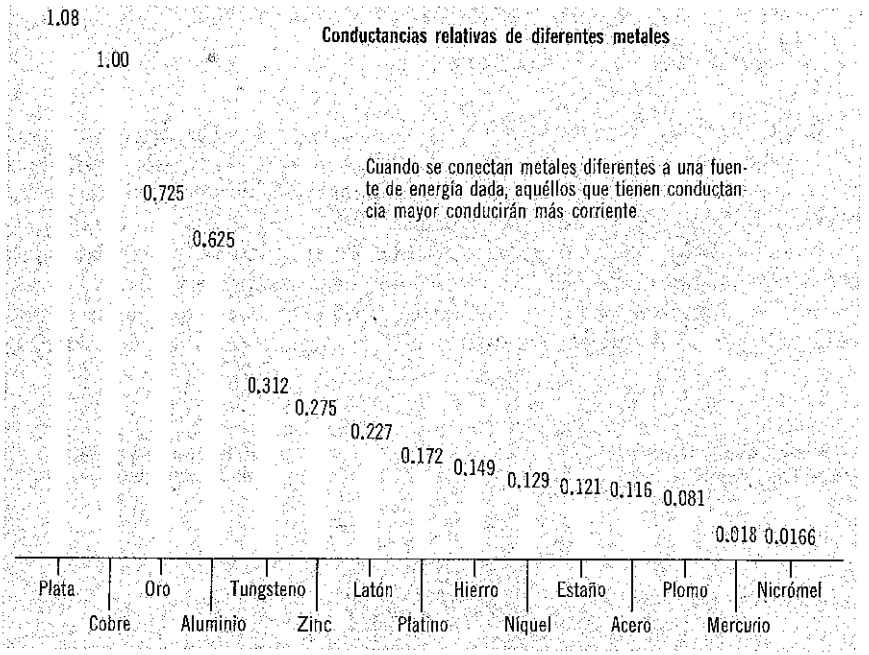
Muchos tipos de interruptores eléctricos se usan actualmente. Cada tipo tiene su propia presentación esquemática, de manera que puede observarse un diagrama de circuito y saber qué tipo de interruptor se usa



Interruptor de navaja o palanca

Interruptor de botón

Interruptor de pastillas



conductancia

No todos los materiales conducen la corriente con la misma eficacia. Si el lector recuerda algo de la teoría eléctrica básica que se presentó en el volumen 1, sabrá que existen dos clases básicas de material que interesan en materia de electricidad. Estos son *los conductores* y *los aisladores*. Los conductores facilitan el flujo de la corriente y los aisladores se oponen a este flujo. La razón de esto es que los conductores tienen muchos *electrones libres*.

La mayor parte de los metales son buenos conductores. Sin embargo, algunos son mejores que otros debido a que no todos tienen el mismo número de electrones libres. La facilidad con que un metal deja fluir la corriente se describe con el término *conductancia*. Si se usa la misma fuente de tensión con metales diferentes, por los metales con alta conductancia fluirá una corriente mayor. La gráfica de barras da la conductancia comparada de algunos metales similares. La plata tiene la conductancia más elevada; pero como el cobre se usa con mayor frecuencia que la plata porque cuesta menos; al cobre se le da una clasificación de conductancia de 1 y a los otros metales se les dan valores en comparación con el del cobre. Por ejemplo, el tungsteno que se usa en los focos, sólo tiene 0.312 de la conductancia del cobre. Por lo tanto, el cobre dejará fluir más de 3 veces la cantidad de corriente que el tungsteno si ambos se conectan a la misma fuente de energía eléctrica.

resumen

☐ El circuito eléctrico es el medio físico para lograr que la electricidad se transforme de fenómeno en uso práctico. ☐ El circuito eléctrico consta de 1) una fuente de energía; 2) alambres o conductores de conexión, y 3) un dispositivo que aproveche la energía eléctrica de la fuente. ☐ El dispositivo que aprovecha la energía eléctrica es la carga. ☐ Para que exista flujo de corriente, debe tenerse un conducto completo desde la terminal negativa de la fuente de energía a través de los conductores de conexión y la carga, regresando a la terminal positiva de la fuente. ☐ Se usa un interruptor para abrir y cerrar el conducto entre la fuente y la carga. Cuando un interruptor está abierto no hay una trayectoria continua a través del circuito que, por lo tanto, está abierto. Cuando un interruptor está cerrado si hay una trayectoria continua y entonces se dice que el circuito está cerrado.

☐ La fuente de potencia produce energía eléctrica por medios químicos, magnéticos o de otro tipo. ☐ La fuente de energía que se estudia en este volumen es una fuente de corriente continua: una batería, un generador c-c o una fuente de electrones. La teoría de operación de circuitos es la misma, independientemente del tipo de fuente usada. ☐ Generalmente el circuito está diseñado para operar con un flujo de corriente específico. Un valor demasiado bajo puede ser la causa que no funcione la carga; un valor demasiado alto puede dañar la fuente de tensión o la carga. ☐ Hay dos factores que determinan cómo será el flujo de la corriente en un circuito c-c 1) la cantidad de tensión alimentada, y 2) el grado de eficacia con que la carga y los conductores conducen la corriente.

☐ Dos materiales importantes en electricidad son los conductores y los aisladores. Los conductores permiten el flujo de corriente; los aisladores se oponen a él. ☐ La facilidad con la que fluye una corriente por un metal se conoce como conductancia. ☐ Todos los metales tienen una clasificación de conductancia que indica la eficacia con que conducen la electricidad, en comparación con el cobre. ☐ El mejor conductor es la plata, pero el cobre se usa más frecuentemente a causa de su menor precio.

preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son los tres elementos básicos de un circuito eléctrico?
2. ¿Qué significa circuito *abierto*?
3. ¿Con qué se controla un circuito para abrirlo o cerrarlo?
4. ¿Qué significa la palabra *carga*?
5. ¿Existe algún caso en que pueda considerarse como carga a una batería? Explíquelo.
6. ¿Que tienen en común una batería, un generador de c-c y una fuente de electrones?
7. ¿Qué es lo que controla el flujo de corriente en un circuito?
8. ¿Qué significa la expresión *clasificación de conductancia*?
9. ¿En qué metal se basan las clasificaciones de conductancia?
10. ¿Qué puede suceder si la corriente de un circuito es excesiva?

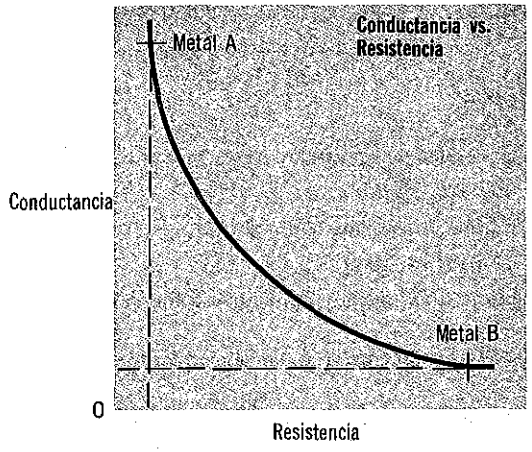
DOS LADOS DE LA MISMA MONEDA

Los materiales de baja resistencia son los mejores conductores

Los materiales de alta conductancia son los mejores conductores

resistencia

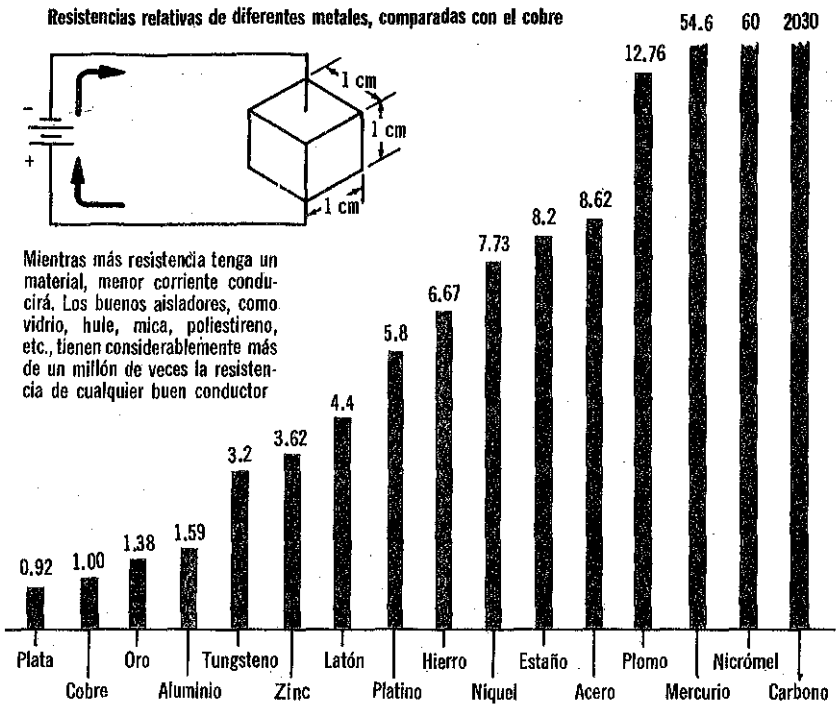
El término *conductancia* se usa para describir el grado de eficacia con que un material permite el flujo de la corriente. Cuanto más alta sea la clasificación de conductancia de un metal, mayor cantidad de corriente conducirá. De la misma manera, cuanto más baja sea la clasificación de conductancia de un metal, menor será la corriente que conduzca. Otra forma en que se puede expresar esto es diciendo que los materiales de *baja conductancia* se oponen o *resisten* al flujo de la corriente eléctrica. Algunos materiales, pues, ofrecen mayor *resistencia* al flujo de los electrones que otros. En realidad ésta es la forma en que se clasifican los materiales en el campo de la electricidad. Los buenos conductores tienen baja resistencia y los buenos aisladores, tienen alta resistencia.



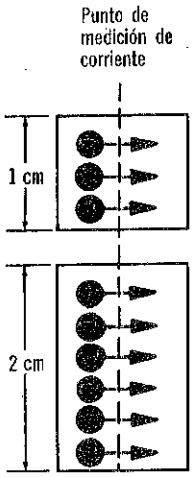
El metal A es el mejor conductor de los dos. Es un material de alta conductancia. En otras palabras, tiene baja resistencia. El metal B es un material de baja conductancia. En otras palabras, tiene alta resistencia.

resistencia de los diferentes conductores

Puesto que los diferentes metales tienen diferentes clasificaciones de conductancia, también deben tener diferentes clasificaciones de resistencia. Las clasificaciones de resistencia de los diferentes metales se pueden determinar experimentando con un trozo estándar de cada metal en un circuito eléctrico. Si de cada uno de los metales más comunes se corta una pieza de tamaño estándar o normal y luego se conectan una por una a una batería, se podrá observar que fluirán diferentes cantidades de corriente. Cada metal ofrece una resistencia diferente al movimiento de los electrones.

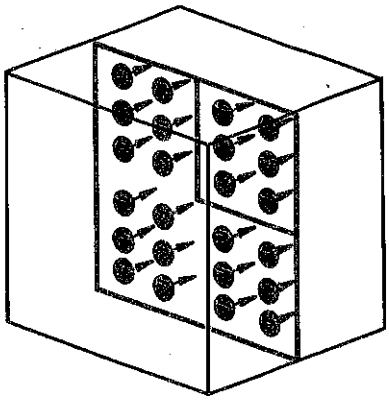


El tamaño normal que generalmente se utiliza para probar la resistencia de los metales es un cubo de un centímetro por lado. La gráfica de barras muestra la resistencia de algunos metales comunes en comparación con el cobre. La plata es mejor conductor que el cobre debido a que tiene menor resistencia. El nicrómel tiene 60 veces más resistencia que el cobre, por lo que el cobre conducirá 60 veces más corriente que el nicrómel en caso de conectarlos a la misma batería, primero uno y luego el otro.



Cuando un conductor es más grueso, conducirá más corriente y tendrá menos resistencia

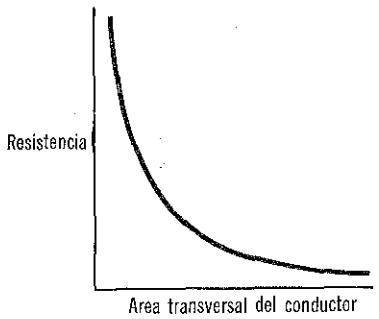
Los conductores con mayor área transversal tendrán más electrones libres disponibles y, en consecuencia, menos resistencia



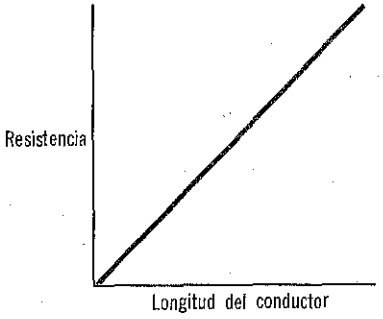
cómo puede reducirse la resistencia

En realidad, la resistencia de todo material depende del número de electrones libres que tenga. Si se tiene presente lo explicado en el volumen 1, se recordará que la corriente eléctrica se mide en amperes; un ampere es 6.280,000.000,000.000,000 electrones libres por segundo que pasan por determinado punto de un conductor. Por lo tanto, un buen conductor debe tener el número suficiente de electrones libres para permitir el flujo de varios amperes. Puesto que la corriente es una medida de los electrones que pasan por un punto en un conductor, se puede hacer que haya más electrones disponibles, mediante una pieza de metal *más gruesa* de manera que fluya *más corriente*.

Un trozo de cobre de 2 centímetros de altura y 1 centímetro de anchura tendrá el doble de electrones libres disponibles a lo largo del punto en que se mide la corriente que un trozo de cobre de sólo 1 centímetro de altura y 1 centímetro de anchura. El cobre que tiene dos veces la altura del otro conducirá el doble de la corriente. Si se usa cobre de 2 centímetros de anchura, se duplicará la corriente y nuevamente la resistencia se reducirá a la mitad. Cuando se aumenta la anchura o la altura de una pieza de metal, se aumenta su *área transversal*. Cuanto *mayor* sea el *área transversal* de un conductor, *más baja* será *su resistencia*.



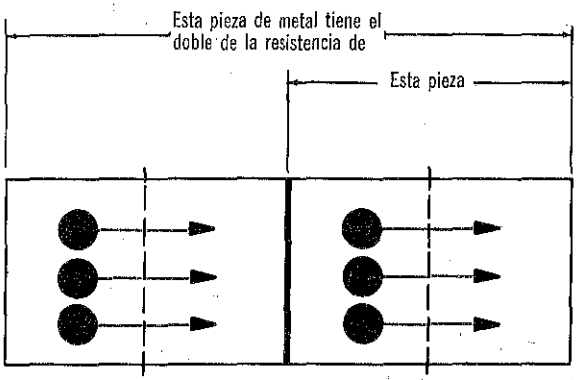
El aumento del área transversal de un conductor disminuye su resistencia



El aumento de la longitud de un conductor aumenta su resistencia

cómo puede aumentarse la resistencia

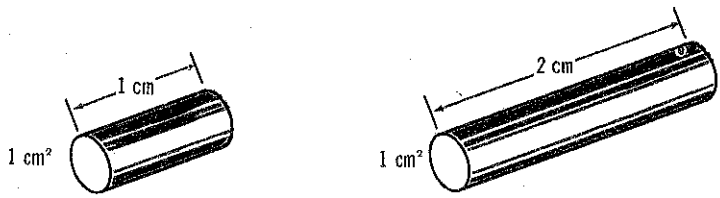
Al aumentar el área transversal de un conductor, habrá un mayor número de electrones libres para corriente disminuyendo la resistencia del conductor. De ahí se podría suponer que al cambiar la longitud de un trozo de cobre, sucedería lo mismo. Sin embargo, esto no ocurre así. Aunque un trozo de cobre más largo tenga más electrones libres en toda su extensión, los electrones libres adicionales no están a lo largo de la línea de medición de corriente. En realidad, cada longitud de conductor tiene cierta cantidad de resistencia y cuando se agrega una *longitud adicional* de cobre, se está aumentando la *resistencia*. Cuanto más largo sea un alambre, mayor resistencia tiene.



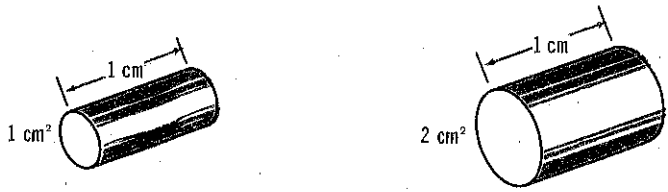
cómo se controla la resistencia

Ahora puede verse que la resistencia de un alambre será mayor mientras más largo sea éste, y menor mientras más corto. También se puede reducir la resistencia aumentando su sección transversal o elevarla disminuyendo su sección transversal.

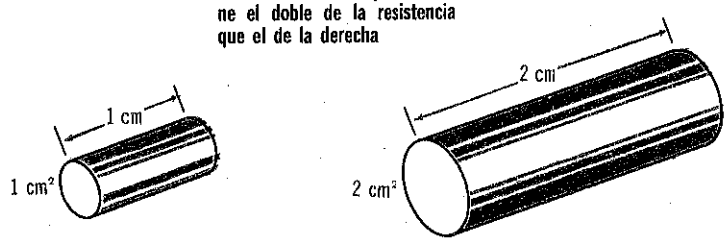
Si se duplica la longitud, se duplicará la resistencia. Debido a esta relación, se dice que la resistencia de un alambre es *directamente proporcional* a su *longitud.*



El alambre de la izquierda tiene la mitad de la resistencia del de la derecha



El alambre de la izquierda tiene el doble de la resistencia que el de la derecha



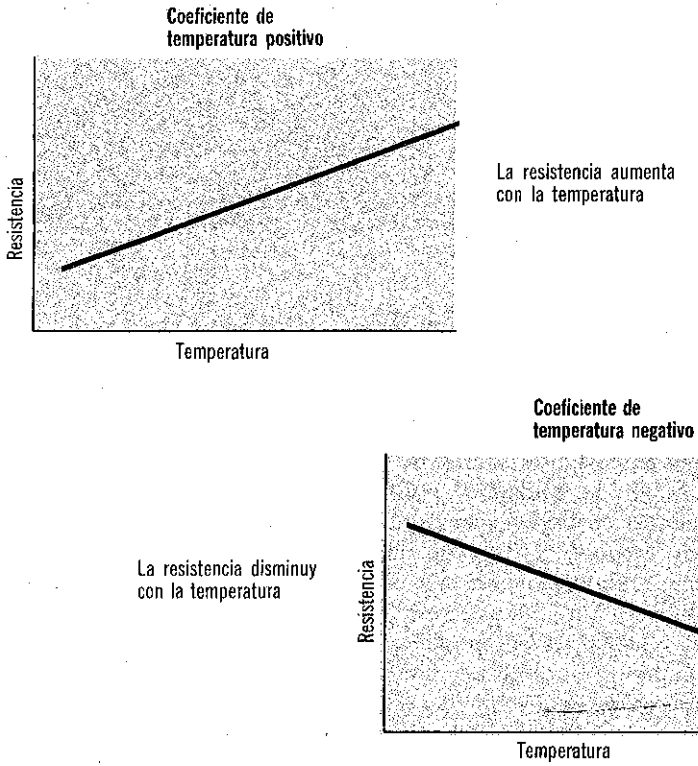
El alambre de la izquierda tiene la misma resistencia que el de la derecha

Si se duplica el área transversal del alambre, se reducirá la resistencia a la mitad. En consecuencia, se dice que la resistencia de un alambre es *inversamente proporcional* a su *sección transversal.*

Así pues, eligiendo el material apropiado para un conductor y haciéndolo de cierta sección transversal y determinada longitud, se puede producir cualquier clase de efecto de resistencia que se desee.

efecto de la temperatura

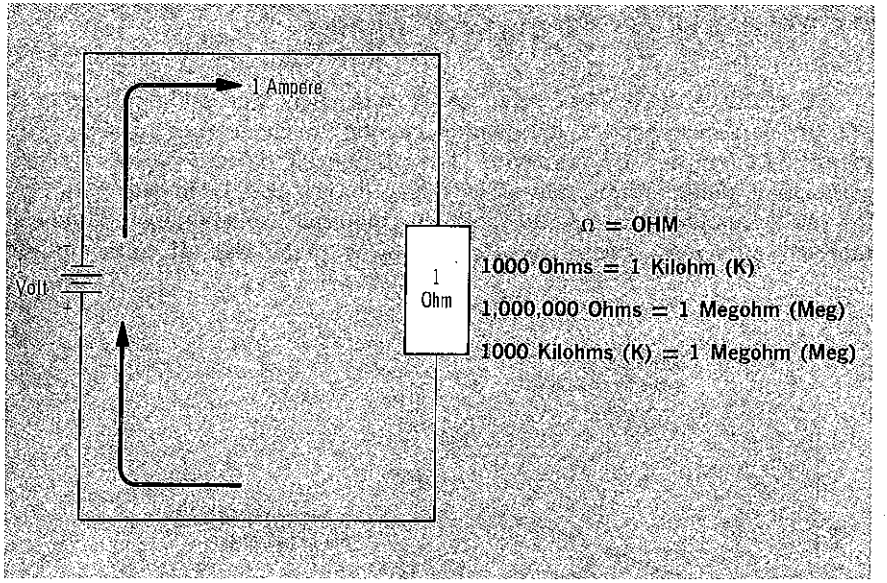
En realidad, los valores relativos de resistencia que se han dado con anterioridad se aplican a los metales cuando se encuentran aproximadamente a la temperatura ambiente. Las resistencias de todos los materiales cambian a temperaturas más altas o más bajas. En la mayor parte de los casos, cuando la temperatura de un material aumenta, su resistencia también aumenta. Pero, con algunos otros materiales, el aumento de



calor hace que la resistencia se reduzca. La cantidad en que se modifica la resistencia por cada grado de cambio de temperatura se llama *coeficiente de temperatura.* Y las palabras "positivo" y "negativo" se usan para indicar si la resistencia aumenta o disminuye al variar la temperatura.

Cuando la resistencia de un material *asciende* al aumentar la temperatura, tiene un coeficiente de temperatura *positivo.*

Cuando la resistencia de un material *disminuye* al aumentar la temperatura, tiene un coeficiente de temperatura *negativo.*



unidad de resistencia

A principios del siglo XIX, el físico alemán Georg Simon Ohm efectuó numerosos experimentos con electricidad e hizo algunos de los primeros descubrimientos importantes acerca de la naturaleza de la resistencia eléctrica. En su honor, la unidad de resistencia se ha llamado *ohm*.

Se dice que un conductor tiene una resistencia de 1 ohm cuando una fem de 1 volt produce el flujo de una corriente de 1 ampere a través de ese conductor. Naturalmente, si 1 volt produce solamente ½ ampere de corriente, entonces el conductor tiene 2 veces la resistencia o sea 2 ohms. Gracias a esta relación, es posible determinar la resistencia exacta de todos los tipos, tamaños y formas de conductores. La resistencia puede variar desde fracciones de 1 ohm hasta kilohms (1,000 ohms) y megohms (1.000,000 ohms). Suele usarse la letra griega omega (Ω) como símbolo del ohm.

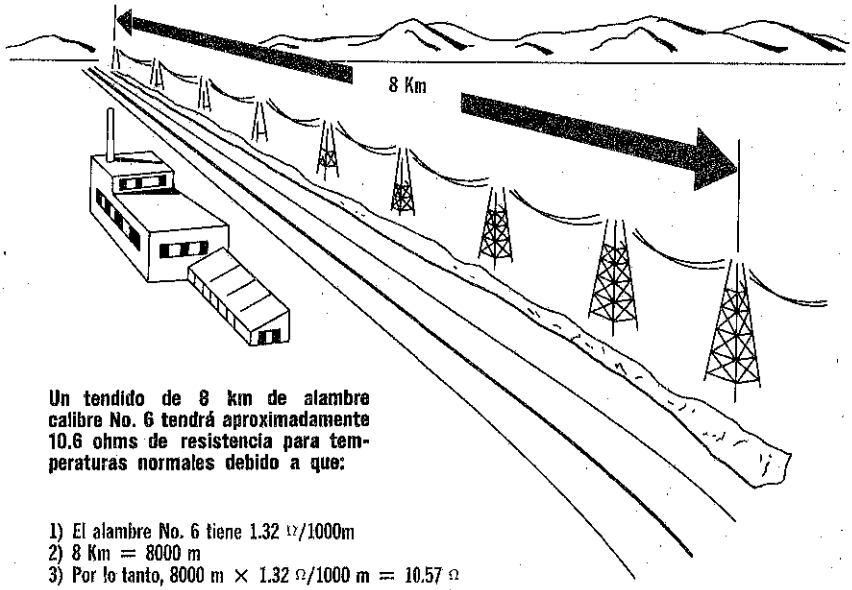
CONVERSION DE UNIDADES

ohms ÷ 1,000 = = kilohms (K)
ohms ÷ 1,000,000 = megohms (Meg)
kilohms (K) ÷ 1,000 = megohms (Meg)
kilohms × 1,000 = ohms
megohms × 1,000,000 = ohms
megohms × 1,000 = kilohms (K)

500,000 ohms = 500 kilohms = 0.5 megohm
o
500,000 Ω = 500 K = 0.5 Meg

resistencia de los alambres

Puesto que la resistencia de un alambre tiene un efecto definido sobre la cantidad de corriente que fluye en un circuito eléctrico, conviene saber cuánta resistencia se tiene en longitudes diferentes de calibres diferentes de alambre. La tabla de la página 2-18 ofrece esta información respecto al alambre de cobre disponible comercialmente.



Un tendido de 8 km de alambre calibre No. 6 tendrá aproximadamente 10.6 ohms de resistencia para temperaturas normales debido a que:

1) El alambre No. 6 tiene 1.32 Ω/1000m
2) 8 Km = 8000 m
3) Por lo tanto, 8000 m × 1.32 Ω/1000 m = 10.57 Ω

Originalmente, la tabla se llamó Calibre de Alambre Brown and Sharpe, aunque en la actualidad se conoce como Calibre de Alambre Estándar Americano (American Standard Wire Gauge). Los diferentes diámetros de alambre de cobre se identifican por números de calibre. Se incluyen 40 calibres, desde el 0000 hasta el 36. Cuanto mayor sea el número de calibre, más pequeño será el diámetro y el área transversal del alambre. Por lo tanto, los *calibres* de alambre de número *mayor* tienen *más resistencia*. La tabla indica el diámetro de cada calibre y la resistencia típica de 1,000 pies de alambre. Las resistencias aparecen tanto para la temperatura normal de 21 grados centígrados (70 grados F) y una temperatura alta de 75 grados centígrados (167 grados F).

Resistencia de los alambres (cont.)

CALIBRES DE ALAMBRE ESTANDAR AMERICANO

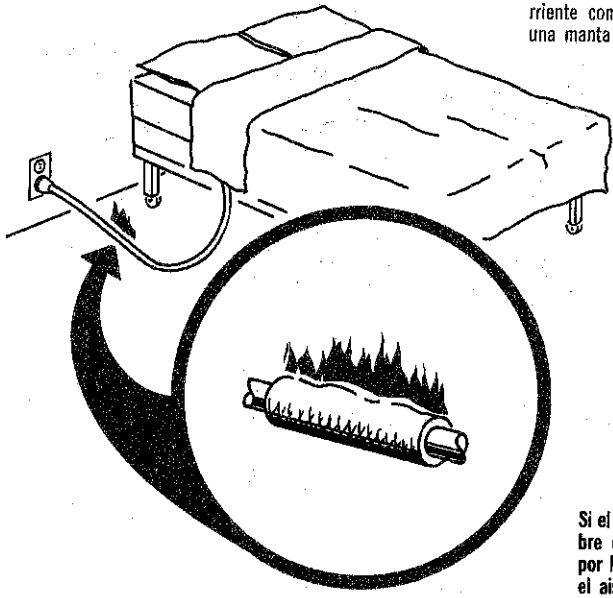
Dimensiones y resistencias típicas de alambre de cobre comercial

Calibre B & S No.	Diámetro del alambre desnudo (pulgadas)	Ohms por 1,000 pies (305 m) 70°F (21°C)	Ohms por 1,000 pies (305 m) 167°F (75°C)	Capacidad de corriente (amperes) Aislamiento de hule	Capacidad de corriente (amperes) Otro aislamiento
0000 (4/0)	0.460	0.050	0.060	160–248	193–310
000 (3/0)	0.410	0.062	0.075	138–215	166–429
00 (2/0)	0.365	0.080	0.095	120–185	145–372
0	0.325	0.100	0.119	105–160	127–325
1	0.289	0.127	0.150	91–136	110–280
2	0.258	0.159	0.190	80–118	96–241
3	0.229	0.202	0.240	69–101	83–211
4	0.204	0.254	0.302	60–87	72–180
5	0.182	0.319	0.381	52–76	63–156
6	0.162	0.403	0.480	45–65	54–134
7	0.144	0.508	0.606	45–365	54–134
8	0.128	0.645	0.764	35–48	41–100
9	0.114	0.813	0.963	35–48	41–100
10	0.102	1.02	1.216	25–35	30–75
11	0.091	1.29	1.562	25–35	30–75
12	0.081	1.62	1.901	20–26	24–57
13	0.072	2.04	2.486	20–23	24–57
14	0.064	2.57	3.071	15–20	18–43
15	0.057	3.24	3.870	15–20	18–43
16	0.051	4.10	4.884	6	10
17	0.045	5.15	6.158	6	10
18	0.040	6.50	7.765	3–6	6
19	0.036	8.21	9.792	3	6
20	0.032	10.3	12.35		
21	0.028	13.0	15.57		
22	0.025	16.5	19.58		
23	0.022	20.7	24.78		
24	0.020	26.2	31.22		
25	0.018	33.0	39.38		
26	0.016	41.8	49.64		
27	0.014	52.4	62.59		
28	0.013	66.4	78.98		
29	0.011	82.8	99.63		
30	0.010	106	125.60		
31	0.009	134	158.20		
32	0.008	165	199.50		
33	0.007	210	241.60		
34	0.006	266	317.60		
35	0.005	337	400.00		
36	0.005	428	504.50		

¿cuánta corriente puede conducir un alambre?

La resistencia de un alambre determina cuánta corriente fluirá a través del alambre cuando se conecta a una fuente de tensión. Pero existen otros dos factores que también deben tomarse en cuenta en relación con el flujo de corriente. Uno de ellos es que, aunque la resistencia del alambre *permita* el flujo de cierta cantidad de corriente, no puede fluir más corriente de la que la fuente puede emitir. Esta es la razón por la que rara vez se conecta un conductor directamente a las terminales de una fuente. Las fuentes tienen un *límite de seguridad* de corriente máxima que pueden alimentar antes de *quemarse*. Esto se explica detalladamente en el volumen 6.

Debido a que la corriente eléctrica calienta un alambre, se usa la corriente como fuente de calor en una manta eléctrica

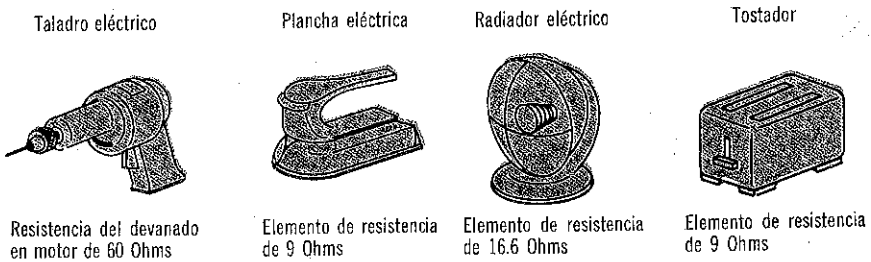


Si el flujo de corriente en un alambre es excesivo, el calor creado por la corriente puede causar que el aislamiento se queme

El segundo factor que debe considerarse es la cantidad de corriente que el alambre puede transmitir sin peligro. Debe recordarse que en el volumen 1 se explicó que la *corriente* eléctrica *calienta* al alambre. Si el alambre se calienta demasiado, su cubierta aislante se quemará y el alambre se puede deteriorar. Esta es la razón por la que la tabla AWG de la página 2-18 da el rango máximo de corriente que puede transmitir sin peligro con alambre de determinado calibre. Como lo ilustra la tabla, si se usa otro material de aislamiento mejor que el hule, el alambre puede transmitir más corriente.

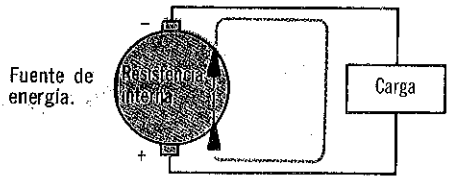
resistencia de la carga y de la fuente de energía

Hasta este punto, se ha estudiado la resistencia de alambres comunes y la forma en que afectan el flujo de corriente. Pero los circuitos deben tener una carga para que desempeñen una función con la electricidad. En la mayor parte de los casos, la resistencia de la carga es mucho mayor que la resistencia del alambrado del circuito. Por ejemplo, un motor usa un gran número de espiras de alambre, de manera que el alambrado del motor en realidad es muy largo. Y un calentador, tostador o plancha eléctrica usan conductores de alta resistencia para producir calor. Por lo tanto, en la cantidad flujo de corriente influye más la resistencia de la carga que la resistencia de los alambres del circuito.

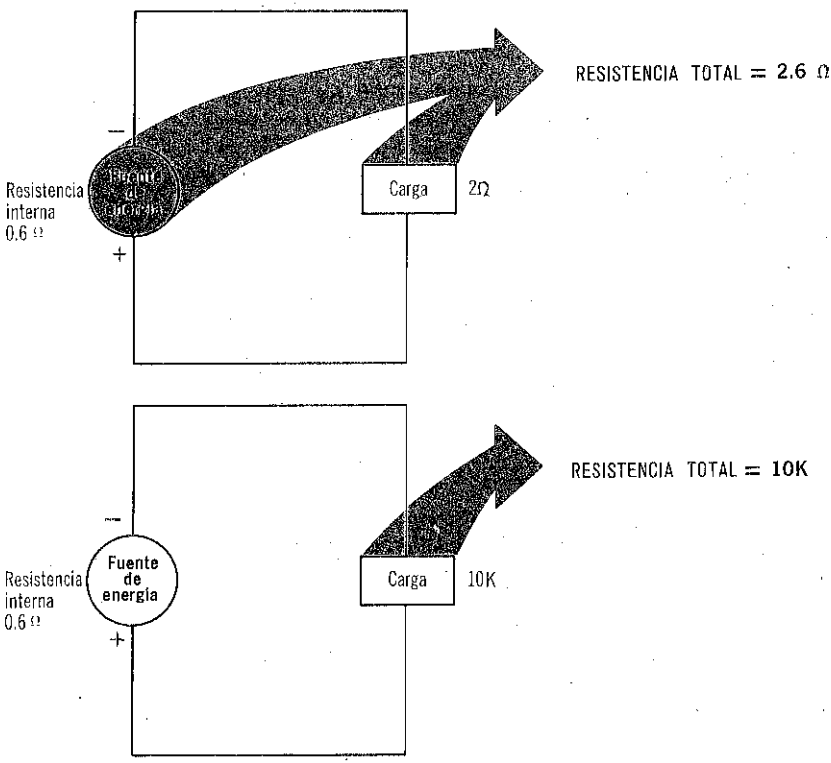


Generalmente, la resistencia de la carga es mucho mayor que la resistencia del alambrado del circuito. El alambrado que se usa para estas piezas de equipo eléctrico tendrá una pequeña resistencia de sólo una fracción de ohm.

Toda fuente de energía tiene alguna resistencia interna.



Existe cierta cantidad de resistencia en todo lo que conduce corriente. Cuando fluye corriente en un circuito, los electrones salen de la terminal negativa de la fuente de energía circulan por los alambres y a través de la carga, entrando nuevamente a la fuente de energía por la terminal positiva. La fuente de energía no suministra una corriente continua de electrones, de la terminal negativa, a menos que pueda reabastecer su contenido de éstos. La corriente que entra a la terminal positiva de la fuente debe pasar a través de ésta para completar el circuito. Por lo tanto, la corriente *dentro de la fuente* fluye de positivo a negativo. Además, toda fuente tiene alguna *resistencia interna* que también se opone al flujo de corriente. Generalmente, esta resistencia interna es muy baja en comparación con la de la carga.



Si la resistencia interna de la fuente de energía es mucho más pequeña que la resistencia de carga, la resistencia total del circuito será de la carga. Sin embargo, debe considerarse la resistencia de las líneas de transmisión largas.

resistencia total del circuito

La resistencia total de un circuito es la suma de las resistencias individuales de la fuente de energía, el alambrado del circuito y la carga. Como ya se sabe, la resistencia de la carga suele ser mucho más alta que la resistencia de la fuente o de los conductores. En estos casos, se puede hacer caso omiso de las resistencias más pequeñas y considerar la resistencia de carga como la resistencia total. Pero si también la resistencia de carga es pequeña, entonces deben agregarse aquellas resistencias para obtener la resistencia total verdadera. Muy raras veces los conductores del circuito tienen una resistencia suficiente para tomarla en cuenta. Pero con líneas largas de potencia eléctrica, telefónicas o telegráficas, la resistencia es suficientemente elevada, de manera que debe considerarse.

resumen

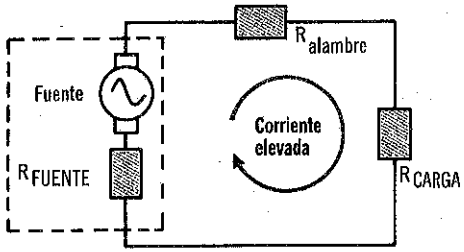
☐ En electricidad, los materiales se clasifican por sus resistencias al flujo de electrones. ☐ Los buenos conductores tienen baja resistencia y los buenos aisladores tienen alta resistencia. ☐ La resistencia de un alambre se determina por medio del tipo de material y las dimensiones del alambre. Cuanto mayor sea el área transversal del alambre, menor será su resistencia. Cuanto más largo sea, mayor será su resistencia. En otras palabras, la resistencia de un alambre es inversamente proporcional a su área transversal y directamente proporcional a su longitud.

☐ El coeficiente de temperatura de un material indica qué efecto tiene la temperatura en la resistencia del material. Un coeficiente de temperatura positiva significa que la resistencia aumenta si asciende la temperatura; un coeficiente negativo significa que la resistencia disminuye si aumenta la temperatura. ☐ La unidad de resistencia es el ohm. Existe un ohm cuando una fem de 1 volt causa el flujo de una corriente de 1 amper.

☐ El calibre de alambre estándar americano indica la resistencia y características de capacidad de corriente de diferentes calibres de alambre de cobre. Cuanto más alto sea el número CAEA, más pequeño será el diámetro del alambre y, por lo tanto, su resistencia será mayor. ☐ Aunque un alambre de determinado calibre puede permitir el flujo de una alta corriente, la corriente efectiva en un circuito estará determinada por: 1) el límite de seguridad con que la fuente puede transmitir sin quemarse, y 2) el límite de seguridad con que el conductor puede transmitir. ☐ La resistencia total de un circuito es la suma de las resistencias de la fuente de energía, el alambrado del circuito y la carga. ☐ Generalmente, la resistencia de carga es tan superior a la de la fuente o la del alambrado, que se puede considerar como la resistencia total.

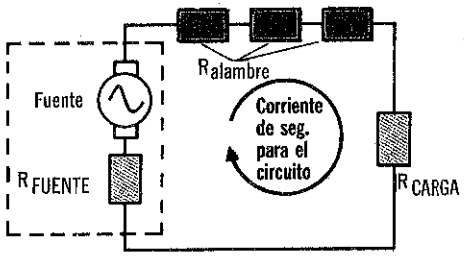
preguntas de repaso

1. ¿Sería un metal con clasificación de conductancia de 0.99 un aislador bueno o malo?
2. Cierto material tiene una resistencia de 15 ohms. Si se triplicara su área transversal, ¿cuál sería su resistencia?
3. Defina *coeficiente de temperatura.*
4. ¿Influye la longitud de un alambre en su coeficiente de temperatura?
5. Defina *resistencia interna* de una fuente de energía (eléctrica).
6. ¿Tiene el cobre un coeficiente de temperatura positivo o negativo?
7. ¿Qué debe considerarse al calcular la resistencia total de un circuito?
8. ¿Cuál es la unidad y el símbolo de la resistencia?
9. ¿Qué es el calibre de alambre estándar americano?
10. Si se calienta un alambre de cobre, ¿qué ocurre con su resistencia?

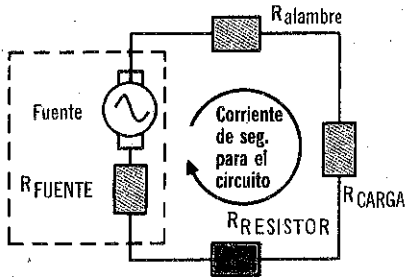


Dos métodos posibles para reducir el valor de la corriente en un circuito con una fuente de tensión fija:

(1) Aumentar la resistencia de los conductores de conexión



(2) Agregar resistencias al circuito

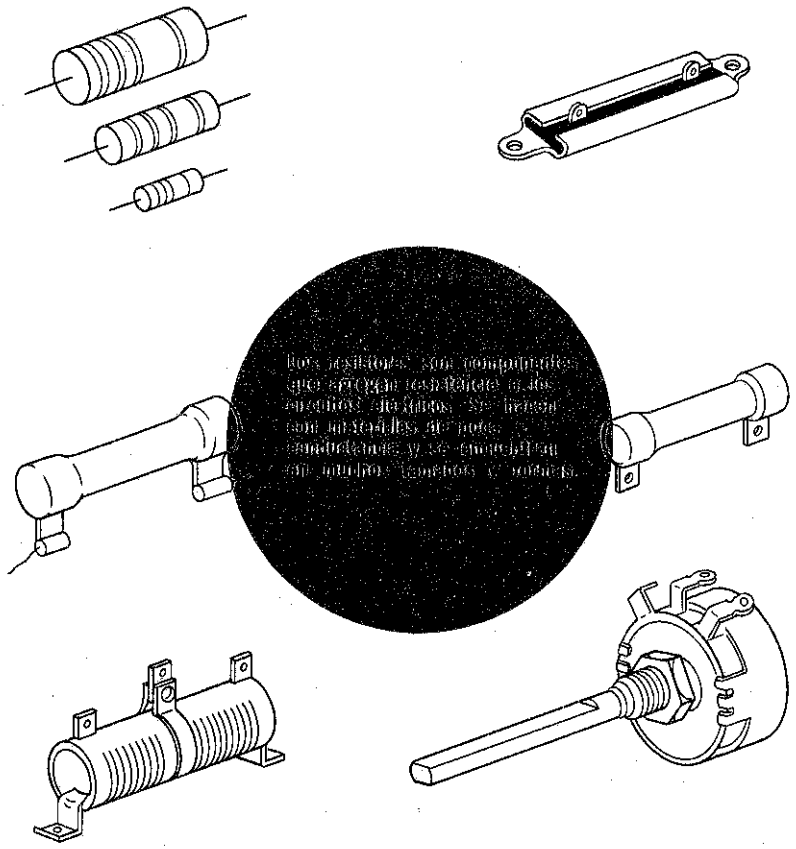


resistores

Con frecuencia ocurre que, si se conecta una carga a una fuente de tensión dada, puede fluir demasiada corriente en el circuito. Esto podría suceder si la resistencia de la carga fuese muy baja o la tensión de salida de la fuente, muy alta. La corriente puede reducirse, bajando la tensión de la fuente; sin embargo, esto es generalmente imposible, o por lo menos impráctico. Como ya se sabe, la única otra forma que existe para disminuir la corriente, es agregar resistencia al circuito, lo cual se puede hacer aumentando la resistencia de la fuente de tensión, de la carga o de los conductores de conexión. Sin embargo, las resistencias de la fuente y la carga son intrínsecas a los dispositivos y no se pueden cambiar. Sólo quedan los conductores; pero su resistencia es tan baja que se necesitarían muchos kilómetros de alambre para agregar unos cuantos cientos de ohms a un circuito. Naturalmente, se pueden usar conductores de mayor resistencia y, de hecho, a esto se recurrió en el pasado para ciertas aplicaciones. Sin embargo, si siempre se hiciera esto, aumentaría grandemente el número de tipos diferentes de conductores usados para interconectar circuitos eléctricos. Así pues, lo que se necesita es un método para sumar fácilmente varias cantidades de resistencia a un circuito sin cambiar drásticamente su tamaño físico ni los materiales usados para construirlo. Los *resistores* son los componentes del circuito eléctrico que se usan para lograrlo.

uso de los resistores

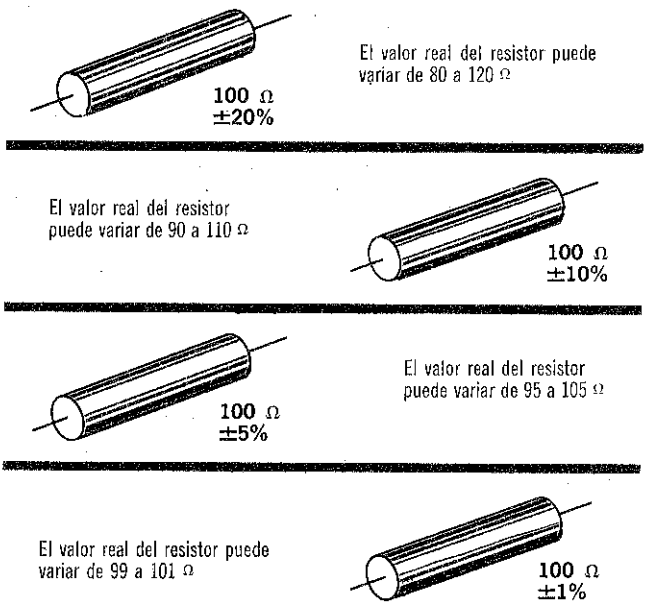
Los resistores se usan para *aumentar* resistencia a un circuito eléctrico. Básicamente, son materiales que ofrecen una alta resistencia al flujo de la corriente. Los materiales que más se usan en los resistores son el *carbón* y *aleaciones especiales de metal* tales como nicromo, constantano y manganana. Un resistor se conecta a un circuito de tal manera que la corriente de circuito pase a través de él y también a través de la carga de la fuente. Entonces, la *resistencia total del circuito* es la suma de las resistencias individuales de la *carga,* la *fuente,* los conductores de *conexión* y el *resistor.* De lo anterior, es posible concluir que, con sólo agregar el resistor apropiado a un circuito, puede cambiarse la resistencia de éste, casi a cualquier valor.



tolerancia

La característica básica de cualquier resistor es el número de ohms de resistencia que tiene. A esto se le llama *valor del resistor* y normalmente está marcado sobre el resistor, de alguna manera. Pero, en realidad, el valor marcado en un resistor es sólo un valor "nominal". El valor real puede ser un poco más alto o más bajo. La razón es que los resistores por lo general se fabrican en serie y, como todos los productos de este tipo, puede haber variaciones durante su manufactura. Para tomar en cuenta estas variaciones, los resistores se marcan con una *tolerancia*.

La tolerancia de un resistor indica qué tanto puede estar su valor arriba o abajo del valor nominal. Los valores típicos de tolerancia son 20, 10, 5 y 1%

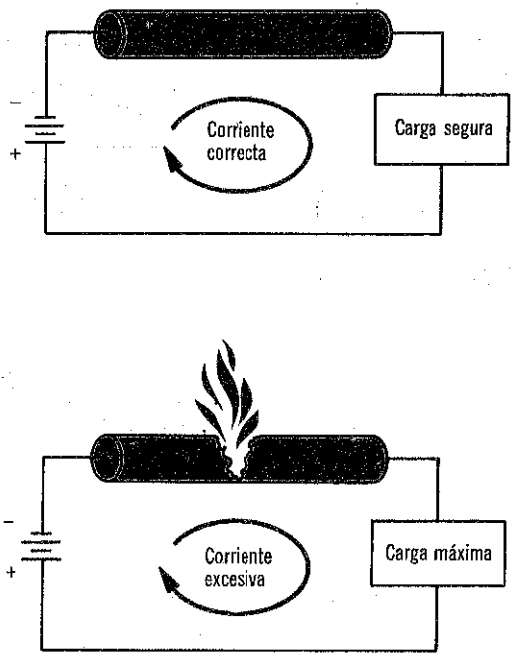


La tolerancia de un resistor generalmente se representa por un porcentaje que indica cuánto puede variar la resistencia efectiva en relación con el valor nominal de resistencia. Así pues, como a un resistor marcado con 100 ohms y una tolerancia de 10%, en realidad podría tener un valor de resistencia en algún punto entre 90 y 110 ohms. Las tolerancias más comunes son 20, 10, 5 y 1%. Como puede deducirse de lo anterior, cuanto menor sea la tolerancia, más caro será el resistor.

dosificación de corriente

Como ya se sabe, una corriente que fluye en un alambre genera calor en éste. La causa de esto es la resistencia del alambre. Cuanto mayor sea esta resistencia, mayor cantidad de calor se produce. En un resistor, la resistencia está concentrada en un área pequeña, de modo que el calor generado por el paso de la corriente también se concentra en un área pequeña. Como resultado, un resistor puede calentarse mucho cuando se conecta a un circuito. Esto significa que debe tener capacidad para resistir el calor generado o bien de expulsarlo hacia el ambiente exterior. Si no puede hacerse ninguna de estas dos cosas, a la larga puede dañarse o destruirse. Aun en el caso de que el calor no sea tan intenso como para dañar el resistor, puede causar un *cambio* considerable en la *resistencia* ya que, si el lector recuerda, cuando la temperatura cambia, la resistencia de todos los materiales también cambia.

Cada resistor tiene su *clasificación de corriente máxima* y no debe usarse en un circuito que lleve más de esta corriente máxima. En caso contrario, el resistor puede quemarse. La clasificación de corriente de un resistor normalmente equivale a la *clasificación en watts* del propio resistor. Esto se explicará más adelante.

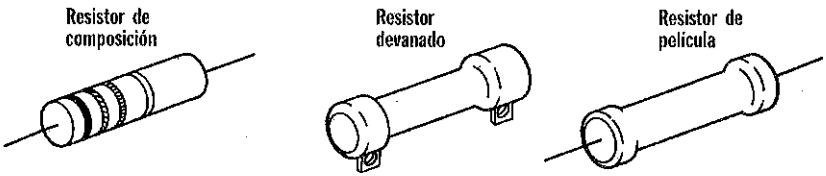


Todos los resistores están diseñados para una cierta corriente máxima. Si se excede esta corriente, el calor generado en el resistor causará un cambio en la resistencia y posiblemente llegue a destruir el resistor. La clasificación de potencia determina la corriente máxima que puede llevar un resistor

tipos de resistores

Con base en lo que ya se sabe de resistores, podría pensarse que la selección de un resistor para un circuito es una cuestión sencilla; sólo se trataría de escoger aquel que tuviera la resistencia y la tolerancia adecuadas y que también pudiera conducir la corriente del circuito sin quemarse. Aunque estas consideraciones son importantes, no son las únicas que deben hacerse. Existen muchas más, tales como costo del resistor, su solidez, cómo está montado en un circuito y la consideración de si el tiempo o el uso prolongado habrán de causar cambios en el valor de su resistencia. Así pues, deben considerarse muchos puntos cuando se selecciona un resistor. Sin embargo, no todos esos puntos son importantes en todos los casos.

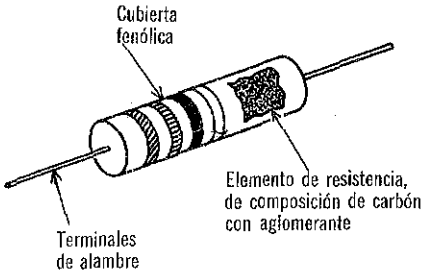
Por ejemplo, el costo de los resistores para un pequeño radio de mesa puede ser muy importante para el fabricante, pero no sus tolerancias. Si se fabricara un solo tipo de resistor que pudiera usarse en todos los circuitos y en toda circunstancia, sería muy costoso y tendría muchas características que frecuentemente serían innecesarias. En lugar de ello, se fabrican diferentes tipos de resistores, cada uno de ellos adecuado para ciertos usos.



La mayor parte de los resistores que se usan actualmente son de uno de dos tipos básicos: *resistores de composición* o *resistores devanados*. Sin embargo, cada vez se usa más un tercer tipo, llamado *resistores de película*.

resistores de composición

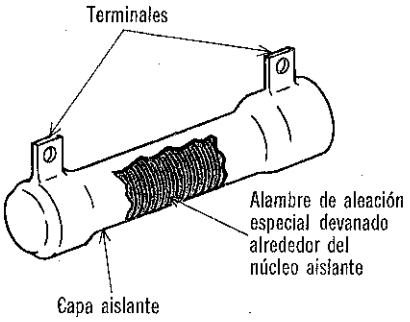
En la mayor parte de los casos en que se emplea un resistor, los requisitos no son difíciles de satisfacer y lo que se necesita es un resistor que cumpla su función en la forma más económica posible. El tipo de resistor que se usa con más frecuencia en estos casos es el *resistor de composición*. El tipo más común de resistor de composición consta esencialmente de un elemento de resistencia de *carbón pulverizado*, una caja plástica para sellar y proteger al elemento de resistencia y *terminales* para conectar el resistor en el circuito. Según puede apreciarse en la gráfica de barras de la página 2-11 el carbón tiene una resistencia de 2,030 veces superior a la del cobre. Por lo tanto, sólo se necesitan pequeñas cantidades de carbón para obtener una alta resistencia. El carbón pulverizado se mezcla con un material aislante, y el valor del resistor depende de las cantidades relativas de carbón y material aglutinante que se usen.



Siempre debe tenerse cuidado cuando se soldan resistores de composición. El calor del cautín puede ser conducido a lo largo de las terminales al elemento de resistencia y causar un cambio significativo en el valor del resistor.

Ventajas	Desventajas
Pequeño	Se sobrecalienta con altas corrientes
Sólido	Alto coeficiente de temperatura
Bajo costo	Amplio rango de tolerancia

Los resistores de composición se hacen con valores de resistencia que varían desde menos de 10 ohms hasta más de 20 millones de ohms (20 mohms) y con tolerancias de 20, 10 y 5%. No pueden transmitir altas corrientes sin sobrecalentarse y tienen elevados coeficientes de temperatura. Sin embargo, tienen ventajas por su tamaño reducido, solidez, y bajo costo. En general, los resistores de composición se usan en aplicaciones en las que no se manejan corrientes elevadas ni se requieren tolerancias estrechas.



Los resistores de potencia y devanados de alambre pueden soportar altas corrientes y disipar grandes cantidades de calor.

Los resistores devanados de alambre de tipo de precisión tienen tolerancias muy pequeñas y se mantienen dentro de estas tolerancias durante su uso. Esta propiedad de mantener una tolerancia pequeña bajo todas las condiciones de operación recibe el nombre de ESTABILIDAD de un resistor

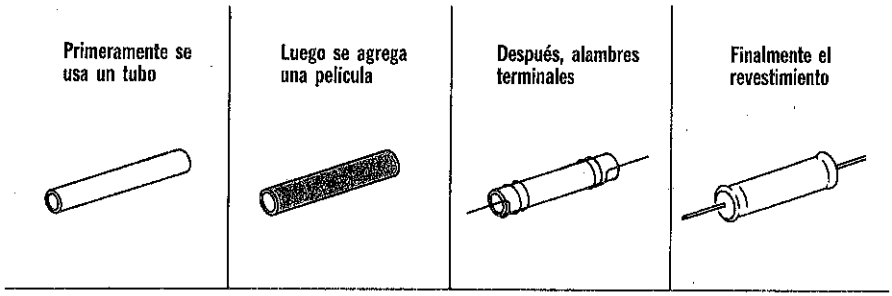
resistores devanados

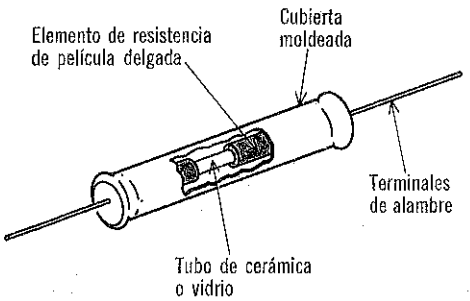
Las dos desventajas principales de los resistores de composición son su limitada capacidad de conducción de corriente y la dificultad de construirlos con tolerancias bajas. Sin embargo, ambas limitaciones se pueden superar aunque con un aumento en costo, utilizando alambre especial de resistencia, en lugar de carbón pulverizado. Generalmente se necesitan tramos largos de alambre para obtener los valores de resistencia necesarios; para mantener al resistor en el valor mínimo posible, el alambre se devana sobre un núcleo. Los resistores así elaborados, reciben el nombre de *resistores devanados (de alambre)*.

Existen dos tipos básicos de resistores devanados: el de *potencia* y el de *precisión*. El de potencia se usa para circuitos que tienen grandes corrientes, en tanto que el de precisión se usa cuando se requieren resistencias con tolerancias muy pequeñas. Esencialmente, ambos tipos se construyen devanando *alambre* de aleación especial sobre un *núcleo* aislante aplicando después un *recubrimiento* de cerámica plástica u otro tipo de material aislante. Los extremos del devanado están unidos a casquillos metálicos en ambos extremos del núcleo. Los casquillos tienen alguna forma de *terminal* para conectar el resistor a un circuito. Las altas corrientes que se usan con resistores de potencia generan gran cantidad de calor, el cual debe ser transferido al ambiente circundante, o disipado. Por consiguiente, estos resistores son grandes, ya que mientras mayor superficie externa tenga un cuerpo, mayor cantidad de calor puede transferir. Los resistores devanados de potencia se hacen para valores de resistencia que varían desde unos cuantos hasta miles (K) de ohms, con tolerancias de 10 ó 20%. Los resistores devanados de precisión se hacen para valores bajos de resistencia, desde 0.1 ohm y con tolerancias tan pequeñas como 0.1%. Para obtener tolerancias tan pequeñas, se usan materiales y métodos de construcción caros y, como resultado, los resistores de precisión también son caros.

resistores de película

Los resistores de película se pueden considerar como intermedios entre los resistores de composición y los resistores devanados de precisión. Tienen algo de la *precisión* y la *estabilidad* del tipo devanado, pero son más pequeños, sólidos y baratos.

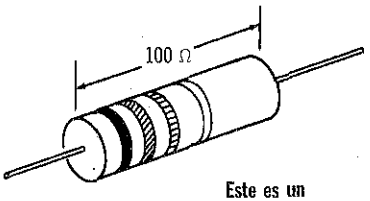




Los resistores de película se denominan según el material de película usado. Así pues, se tienen resistores de película de carbón, resistores de película de boro-carbono, resistores de película metálica y resistores de película de óxido metálico

Los resistores de película generalmente se fabrican depositando, mediante un proceso especial, una *película delgada* de material de resistencia sobre un tubo de vidrio o cerámica. Las terminales para conectar el resistor al circuito se conectan a casquillos en los extremos del tubo. Luego se moldea una capa aislante alrededor de la unidad, para protegerla.

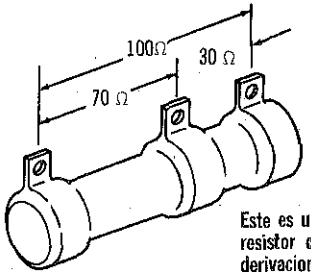
La resistencia de un resistor de película está determinada por el material usado para la película y el *espesor* de ésta. En general, los espesores varían desde 0.00025 hasta 0.00000025 milímetros. Por tal motivo, a estos resistores se les llama frecuentemente resistores de película delgada.



Este es un resistor fijo

Este es el símbolo de un resistor fijo

El valor de un resistor fijo está establecido y no se puede variar



Este es un resistor con derivaciones

Este es el símbolo de un resistor con derivación

Puede obtenerse más de un valor de resistencia de un resistor con derivación. Sin embargo, cada uno de los valores parciales es fijo

resistores fijos

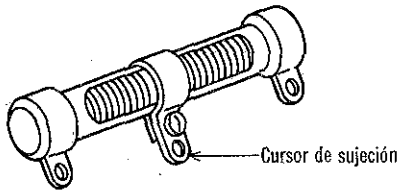
Hasta ahora se ha hablado de la forma en que se clasifican los resistores según los materiales usados para sus elementos de resistencia. Pero existe otra forma de clasificarlos, dependiendo de que el valor de resistencia sea *fijo* e invariable, o bien *variable*. Los tipos de resistores que acabamos de describir tienen dos puntas, conectadas cada una de ellas a un extremo del elemento de resistencia; cuando estos resistores se conectan en un circuito, todo su valor de resistencia se agrega al del circuito. Puede concluirse, pues, que un resistor *fijo* sólo tiene un valor de resistencia. Sin embargo, existe un tipo especial de resistor fijo que tiene más de un valor. Este tipo, además de las terminales en los extremos del elemento de resistencia, tiene una o más terminales adicionales en puntos intermedios entre los extremos del elemento. Conectando diferentes terminales a un circuito, se pueden obtener diferentes valores de resistencia. Sin embargo, cada una de estas resistencias diferentes sigue siendo por sí misma una resistencia fija. Este tipo de resistor recibe el nombre de resistor con *derivación*.

Los resistores fijos pueden ser del tipo de composición, devanados o de película.

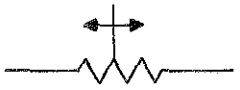
resistores ajustables

Según se dijo en las páginas anteriores, puede concluirse que un resistor fijo no tiene flexibilidad por lo que respecta a su valor de resistencia. Tiene un valor, que no puede ser cambiado o variado. El resistor con derivación ofrece cierta flexibilidad, ya que se puede obtener más de un valor de resistencia de él. Sin embargo, el número de valores de resistencia que se pueden obtener de un resistor con derivación generalmente está limitado a tres o cuatro. En muchas aplicaciones, lo conveniente es un resistor del cual se pueda obtener un *rango de valores de resistencia*, desde 0 hasta algún máximo; por ejemplo, un resistor que puede ajustarse a cualquier valor de 0 a 100 ohms, o quizá de 0 a 25 K. Un tipo de resistor que ofrece esta flexibilidad es el *resistor ajustable*. Un resistor ajustable es similar a un resistor fijo, devanado con derivación, excepto que todo el devanado o parte de él está expuesto. Un *cursor móvil*, con una terminal hace contacto con el devanado y se puede mover a cualquier posición a lo largo del devanado. La resistencia entre la terminal móvil y cualquiera de los extremos depende entonces de la posición del cursor móvil.

Estos resistores no se construyen para ser ajustados frecuentemente. Normalmente se ajustan al valor de resistencia necesario cuando se instalan en un circuito, dejándolos en ese valor.

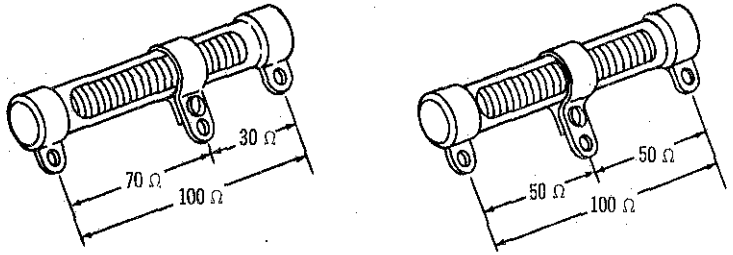


Este es un resistor ajustable

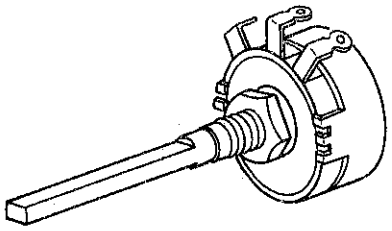


Este es el símbolo de un resistor ajustable

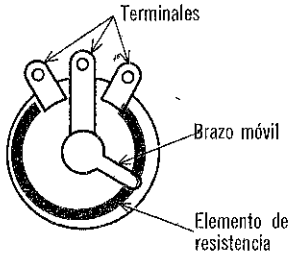
Con un resistor ajustable, se puede obtener cualquier valor de resistencia dentro del rango del resistor



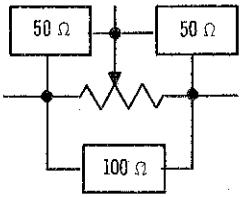
Aunque es posible un amplio rango de valores de resistencia, estos resistores están fabricados de tal manera que el ajuste frecuente es imprácticо

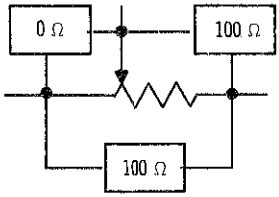


Este es un resistor variable



Generalmente, la resistencia de un resistor variable puede variarse de 0 ohms al valor marcado en la cubierta. La resistencia real dependerá de la posición del brazo móvil y de las terminales empleadas





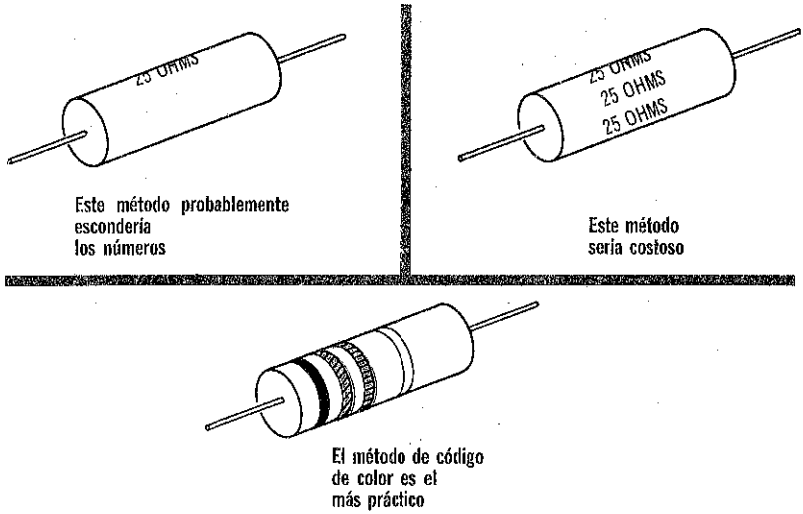
Este es el símbolo de un resistor variable

resistores variables

En muchos dispositivos eléctricos frecuentemente se necesita cambiar un valor de resistencia. Por ejemplo, se tiene el control de volumen del radio común, el control de brillantez del aparato de televisión o un atenuador de luces, o bien, un control de velocidad de un motor. Esto no se puede hacer mediante un resistor ajustable, ya que sería difícil y tardaría demasiado tiempo. Los resistores utilizados deben tener capacidad para variar continuamente dentro de cierto rango de resistencias, lo mismo que los resistores ajustables; pero también debe ser muy *fácil* hacerlos variar, y estar construidos para resistir ajustes *frecuentes*. Los resistores con estas características se llaman resistores *variables*. Generalmente, un resistor variable consta de un elemento de resistencia circular contenido en una cubierta o caja. El elemento puede ser devanado, de composición o de película. Se puede deslizar un contacto móvil sobre el elemento, manteniendo contacto eléctrico con él.

Se hace girar el contacto móvil por medio de un eje. Por lo tanto, la resistencia entre el contacto móvil y los extremos del elemento dependen de la posición del eje. Ambos extremos del elemento de resistencia y el contacto móvil están conectados a terminales externas. Cuando las tres terminales están conectadas al circuito, al resistor se le llama *potenciómetro*. Cuando sólo se usan en el circuito la terminal central y una de las terminales, el resistor recibe el nombre de *reóstato*. Algunas veces, se hacen reóstatos sin la terminal extrema, que no habrá de usarse. Así pues, tenga presente que los potenciómetros y los reóstatos son, ambos, resistores variables. La única diferencia es su forma de aplicación en un circuito.

código de color de resistores



No siempre es práctico enmarcar el valor de resistencia usando números en resistores de composición fijos, en una guía axial. En lugar de ello se emplean bandas coloreadas. La relación de estas bandas con el valor de resistencia, recibe el nombre de código de resistencia de resistores

Todos los resistores tienen su valor de resistencia marcado en alguna forma. Primeramente, podría suponerse que esto se haría siempre por medio de números; por ejemplo, 50 ohms o 1,000 ohms. Los resistores de potencia más grandes, los resistores de precisión y los resistores variables se marcan en esta forma; pero esto es impráctico para resistores fijos y de composición, de tamaño pequeño. Estos resistores a menudo son demasiado pequeños para marcarlos. Además, su forma es tubular y tienen terminales axiales, por lo que pueden montarse en un circuito prácticamente en cualquier posición. Si sus valores de resistencia se marcaran en números, con frecuencia éstos estarían ocultos una vez que los resistores estuvieran conectados en el circuito. Naturalmente, los números se podrían marcar alrededor del resistor; pero esto sería difícil y costoso, desde el punto de vista de manufactura. Este problema se ha resuelto mediante una serie de *bandas de color* alrededor de los resistores para indicar sus valores de resistencia. Las posiciones de las bandas y su color, que constituyen lo que se llama *código de color*, indican los valores de resistencia. Se ha adoptado un solo código estándar de colores en los Estados Unidos, tanto en las Fuerzas Armadas como en la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA) para resistores de composición fija y terminales axiales.*

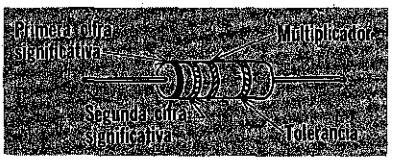
* El mismo código ha sido aceptado en México (N. del T.).

códico de color de resistores estándar

Primera cifra significativa: El color de la primera banda indica el primer dígito del valor del resistor. Por ejemplo, usando la tabla de código de color, si esta banda es amarilla, el primer dígito es 4.

Valor multiplicador: El color de la tercera banda indica por cuánto deben multiplicarse los primeros dos dígitos para obtener el valor de la resistencia. Por ejemplo, mediante la tabla de código de color, si esta banda es verde, los primeros dos dígitos se multiplican por 100,000. También se puede considerar que esta banda indica el número de ceros que deben agregarse a partir del segundo dígito. Usada en esta forma, el número de ceros que aparecen en la columna de cifras significativas de la tabla de código de color es el número de ceros que debe agregarse. Por ejemplo, si esta banda es de color naranja, se agregarán tres ceros después del segundo dígito. Pero si la banda es negra, no se agregan ceros. Si la tercera banda es dorada o plateada, deberá usarse el factor de multiplicación.

Segunda cifra significativa: El color de la segunda banda indica el segundo dígito del valor del resistor. Por ejemplo, según la tabla de código de color, si esta banda es negra, el segundo dígito es cero.

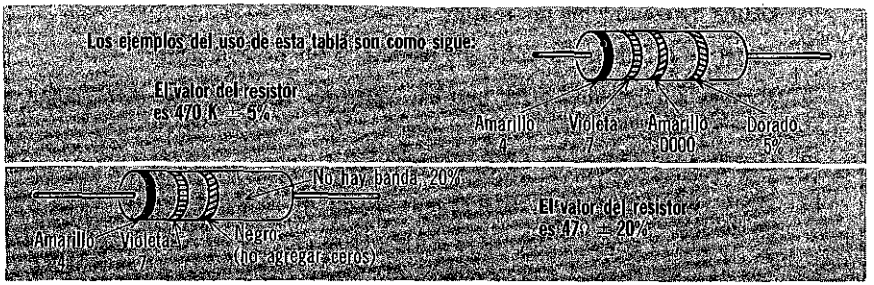


Tolerancia: El color de la cuarta banda indica la tolerancia del resistor. Por ejemplo, si esta banda es dorada, la tolerancia del resistor es ±5%. Si no hay banda de tolerancia en un resistor, automáticamente se considera que la tolerancia es ±20%.

TABLA DE CÓDIGO DE COLOR

Color	Cifras significativas	Valor de multiplicación	Tolerancia
Negro	0	1	—
Café	1	10	—
Rojo	2	100	—
Naranja	3	1,000	—
Amarillo	4	10,000	—
Verde	5	100,000	—
Azul	6	1,000,000	—
Violeta	7	10,000,000	—
Gris	8	100,000,000	—
Blanco	9	1,000,000,000	—
Dorado	—	0.1	±5%
Plateado	—	0.01	±10%
Sin color	—	—	±20%

Los ejemplos del uso de esta tabla son como sigue:



resumen

☐ Los resistores se instalan en un circuito para disminuir el flujo de corriente, aumentando la resistencia. ☐ Existen dos tipos básicos de resistores: de composición y devanados en alambre. Los resistores de película, un tercer tipo, actualmente se están volviendo cada más populares. ☐ Los resistores de composición generalmente se hacen con un elemento de resistencia de carbón pulverizado. Tienen altos coeficientes de temperatura, baja capacidad de corriente y tolerancias elevadas. Entre sus ventajas figuran la solidez, el tamaño pequeño y el bajo costo.

☐ Los resistores devanados generalmente se hacen con alambre especial de resistencia, devanado sobre un núcleo. Tienen alta capacidad de corriente y pueden ser del tipo de potencia o de precisión. Los de potencia tienen alta capacidad de corriente; los de precisión tienen pequeñas tolerancias. ☐ Los resistores de película generalmente se hacen, depositando una película delgada de material de resistencia sobre un tubo de vidrio o cerámica. Tienen algunas de las ventajas, tanto de los resistores de composición como de los devanados.

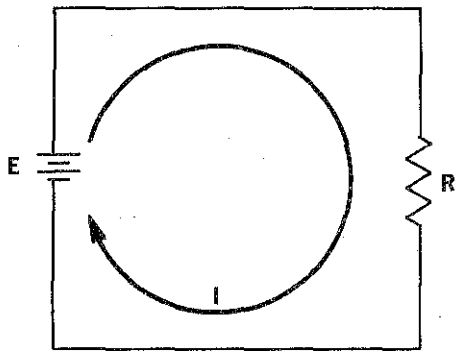
☐ Los resistores ajustables tienen un cursor móvil que se ajusta al valor de resistencia que se requiera al instalarlos en un circuito. No están diseñados para ajustarse frecuentemente. ☐ Los resistores variables son similares a los resistores ajustables, excepto que son continuamente variables, sobre un rango de resistencias. ☐ Si las tres terminales de un resistor variable están conectadas en un circuito, el resistor recibe el nombre de potenciómetro. ☐ Si sólo las terminales central y una de las extremas están conectadas, el resistor se conoce como reóstato. ☐ El Código de Color de Resistores para los de composición fija y el de terminales axiales, indica tanto el valor nominal como la tolerancia del resistor. Las primeras dos bandas de color indican las cifras significativas; la tercera es el multiplicador y la cuarta es la tolerancia.

preguntas de repaso

1. Describa la estructura de los tres tipos de resistores fijos.
2. Señale las ventajas y desventajas de los resistores de composición.
3. Señale las ventajas y desventajas de los resistores devanados.
4. ¿Cuáles son las ventajas de los resistores de película?
5. Defina *valor nominal* de un resistor.
6. Defina *tolerancia* de un resistor.
7. ¿Cuál es la diferencia entre un reóstato y un potenciómetro?
8. ¿Cuáles son las diferencias que hay entre los resistores *con derivación, variables* y *ajustables*?
9. Describir el código de color de resistores.
10. ¿Qué se entiende por *cifras significativas,* de acuerdo con el código de color?

ley de ohm

Según ya se ha indicado, puesto que la tensión produce el flujo de corriente en un circuito cerrado y la resistencia se opone al flujo de ella, existe una relación entre tensión, corriente y resistencia. Esta relación fue determinada primeramente en una serie de experimentos efectuados por Georg Simon Ohm quien, según se recordará de la página 2-16 es el científico en cuyo honor se ha dado nombre a la unidad de resistencia.



Es práctica común el abreviar la corriente como I, el voltaje como E y la resistencia como R.

George Simon Ohm probó que la corriente I, en un circuito c-c, es directamente proporcional a la tensión E, e inversamente proporcional a la resistencia R

Esto significa:
1) Si se eleva E, aumentará I
2) Si se reduce E, disminuirá I
3) Si se aumenta R, disminuirá I
4) Si se reduce R, aumentará I

Ohm encontró que si la resistencia en un circuito se mantenía constante y aumentaba la tensión de la fuente, se produciría un aumento correspondiente en la corriente. Asimismo, una disminución en tensión produciría una disminución en la corriente. Expresado de otra manera, Ohm observó que en un circuito de c-c, la corriente es directamente proporcional a la tensión. Ohm también descubrió que si la tensión de la fuente se mantenía constante, en tanto que la resistencia del circuito aumentaba, la corriente disminuía. En forma similar, una disminución en la resistencia tendría por resultado un aumento en la corriente. En otras palabras, la corriente es inversamente proporcional a la resistencia. Esta relación entre corriente, tensión y resistencia en un circuito de c-c. se conoce como ley de Ohm y se puede resumir como sigue: *en un circuito de c-c, la corriente es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.*

ecuaciones

Hablando estrictamente, la ley de Ohm es un enunciado de proporción y no una ecuación matemática. Sin embargo, si se da la corriente en amperes, la tensión en volts y la resistencia en ohms, entonces la ley de Ohm se puede expresar según la ecuación

$$I = E/R$$

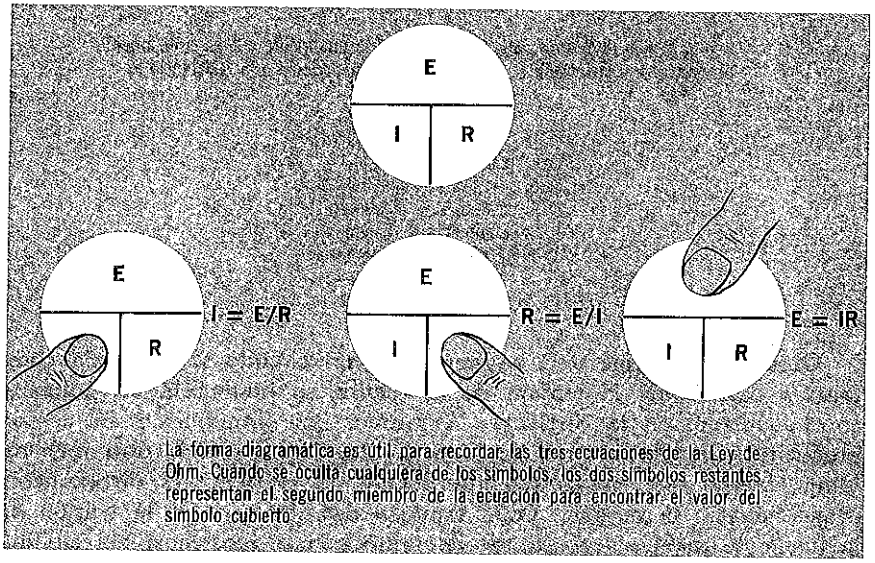
que indica que la corriente (I) es igual a la tensión (E) dividida entre la resistencia (R). Hay dos formas de esta ecuación que son muy útiles para analizar circuitos de c-c.

$$R = E/I$$

que indica que la resistencia (R) es igual a la tensión (E) dividida entre la corriente (I) y

$$E = IR$$

que establece que la tensión (E) es igual a la corriente (I) multiplicada por la resistencia (R).



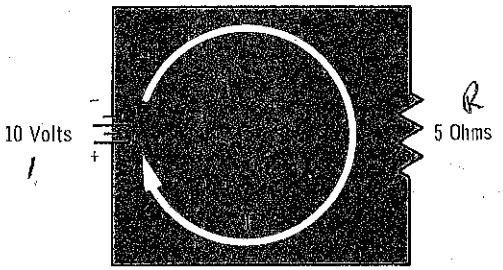
La forma diagramática es útil para recordar las tres ecuaciones de la Ley de Ohm. Cuando se oculta cualquiera de los símbolos, los dos símbolos restantes representan el segundo miembro de la ecuación para encontrar el valor del símbolo cubierto.

Gracias a estas tres ecuaciones, cuando se conocen *dos* de los tres elementos del circuito, el tercero se puede encontrar fácilmente.

Es muy importante *memorizar* estas tres ecuaciones. Se usarán repetidas veces al estudiar y trabajar con circuitos.

cálculo de la corriente

Probablemente en determinado momento sea necesario calcular la corriente que fluye en un circuito. Se sabe que esto se puede hacer mediante la ley de Ohm, de manera que lo primero es decidir cuál de las ecuaciones de la ley de Ohm puede usarse. Una buena práctica que conviene establecer en este punto, es pensar en función de cantidades *conocidas* e *incógnitas*. En toda ecuación, la incógnita es el término cuyo valor se quiere encontrar. Siempre es el término que está a la izquierda del signo igual. Las cantidades conocidas son todos los demás términos de la ecuación. Estos se encuentran a la derecha del signo de igualdad.



Supóngase que se desea encontrar la corriente en el circuito. El primer paso es estudiar el diagrama del circuito y luego establecer en la mente la interrogante en la forma más simple posible, quizás en la forma siguiente:

¿Cuánta corriente produciría un voltaje aplicado de 10 volts a través de una resistencia de 5 ohms?

Puesto que la corriente (I) es la incógnita, se usaría la ecuación

$$I = E/R$$
$$= 10 \text{ Volts}/5 \text{ Ohms}$$
$$= 2 \text{ Amperes}$$

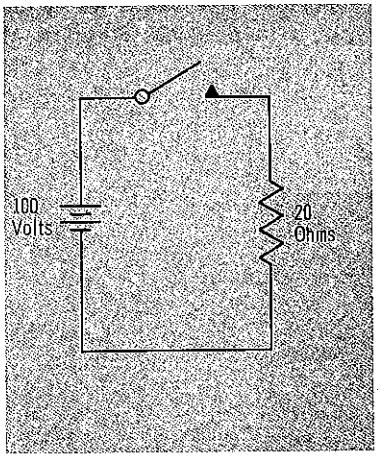
En el problema indicado, se trata de encontrar el valor de la corriente y, por lo tanto, I es la incógnita. Como lo muestra la página 2-38, la ecuación de la ley de Ohm en la cual I es la incógnita es

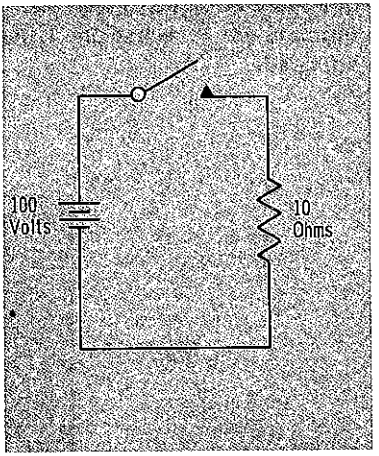
$$I = E/R$$

Por lo tanto, ésta es la ecuación que debe usarse cuando se calcula la corriente en un circuito mediante la ley de Ohm.

cálculo de la corriente (cont.)

El diagrama del circuito de la izquierda muestra un resistor de 20 ohms usado como carga en un circuito con una batería de 100 volts, como fuente de tensión. Si el resistor tiene una capacidad de corriente máxima nominal de 8 amperes, ¿se excederá su capacidad al cerrar el interruptor?





Después de leer la pregunta anterior y estudiar el diagrama, puede concluirse que en realidad son dos preguntas: 1) ¿Qué cantidad de corriente se produciría al aplicar una tensión de 100 volts a través de una resistencia de 20 ohms?, y 2) ¿Es esta corriente desconocida mayor de 8 amperes? Para contestar la primera pregunta, la incógnita es la corriente, por lo que se usa la ecuación $I = E/R$

$$I = E/R = 100 \text{ volts}/20 \text{ ohms} = 5 \text{ amperes}$$

La segunda pregunta se puede contestar entonces con una simple comparación. Puesto que sólo fluye una corriente de 5 amperes, no se excede la capacidad de 8 amperes en el resistor.

¿Qué pasará ahora si se usa un resistor de 10 ohms, también con capacidad máxima de 8 amperes?

Se usa nuevamente la ecuación $I = E/R$.

$$I = E/R = 100 \text{ volts}/10 \text{ ohms} = 10 \text{ amperes}$$

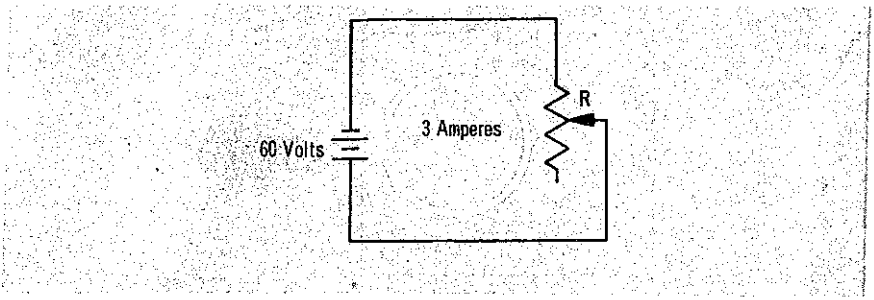
La corriente resultante de 10 amperes excede al límite de 8 amperes. El resistor probablemente se quemará.

cálculo de la resistencia

Según la ley de Ohm, la resistencia se calcula por medio de la ecuación:

$$R = E/I$$

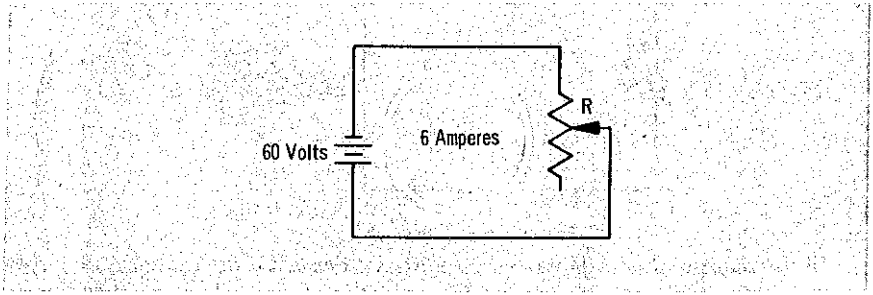
Debe aplicarse esta ecuación a fin de seleccionar el resistor de tamaño adecuado para conectar en un circuito o determinar la resistencia de un resistor u otra carga ya en el circuito.



En el circuito del diagrama fluye una corriente de 3 amperes cuando el reóstato se ajusta a la mitad de su rango. ¿A cuánto debe ascender la resistencia del circuito?

Lo que en realidad se pregunta aquí es lo siguiente: ¿Cuál es la resistencia que, si se le aplica una tensión de 60 volts, produciría una corriente de 3 amperes? Puesto que la resistencia es la incógnita, se emplea la ecuación $R = E/I$.

$$R = E/I = 60 \text{ volts}/3 \text{ amperes} = 20 \text{ ohms}$$



En el circuito anterior, ¿cuánta resistencia tendría que añadir el reóstato al circuito para aumentar la corriente a 6 amperes? También en este caso, la resistencia es la incógnita y se usa la ecuación $R = E/I$.

$$R = E/I = 60 \text{ volts}/6 \text{ amperes} = 10 \text{ ohms}$$

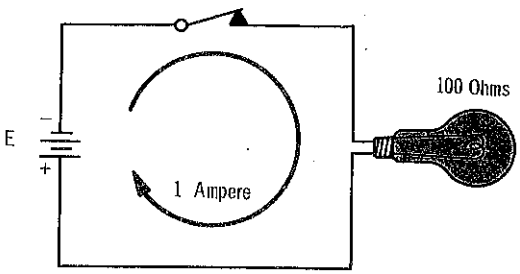
Así pues, para duplicar el valor de la corriente, el de la resistencia debe reducirse a la mitad.

cálculo de la tensión

La tensión se calcula por medio de la ley de Ohm, mediante la ecuación:

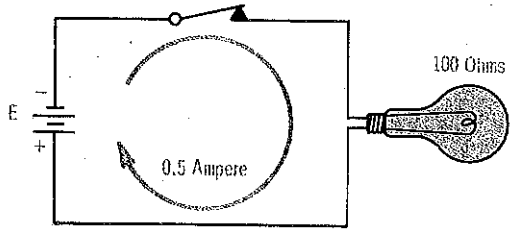
$$E = IR$$

Si el foco del circuito del diagrama tiene una resistencia de 100 ohms y una corriente de 1 ampere en el circuito cuando se cierra el interruptor, ¿cuál es la tensión de salida de la batería?



Después de estudiar el diagrama del circuito se puede ver que, en realidad, la pregunta es la siguiente: ¿Cuál será la tensión producida por el flujo de una corriente de 1 ampere a través de una resistencia de 100 ohms? La tensión es la incógnita, de manera que se aplica la ecuación $E = IR$.

$$E = IR = 1 \text{ ampere} \times 100 \text{ ohms} = 100 \text{ volts}$$



Si la batería ilustrada en el circuito se desgasta de manera que sólo se tienen 0.5 amperes en el circuito, ¿cuál es la tensión de salida de la batería?

Nuevamente se aplica la ecuación de tensión, $E = IR$.

$$E = IR = 0.5 \text{ ampere} \times 100 \text{ ohms} = 50 \text{ volts}$$

De esto se puede concluir que, cuando la tensión de la fuente disminuyó a la mitad, también la corriente se redujo a la mitad.

resumen

☐ La ley de Ohm expresa la relación que existe entre tensión corriente y resistencia en un circuito de c-c. Dicha ley establece que, en un circuito de c-c, la corriente es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.

☐ La ley de Ohm se puede expresar matemáticamente mediante tres ecuaciones: $I = E/R$; que se aplica cuando la cantidad desconocida es I, en el circuito. ☐ $R = E/I$; que se aplica cuando la resistencia R es la cantidad desconocida en el circuito. ☐ $E = IR$; que se aplica cuando la tensión E es la cantidad desconocida en el circuito.

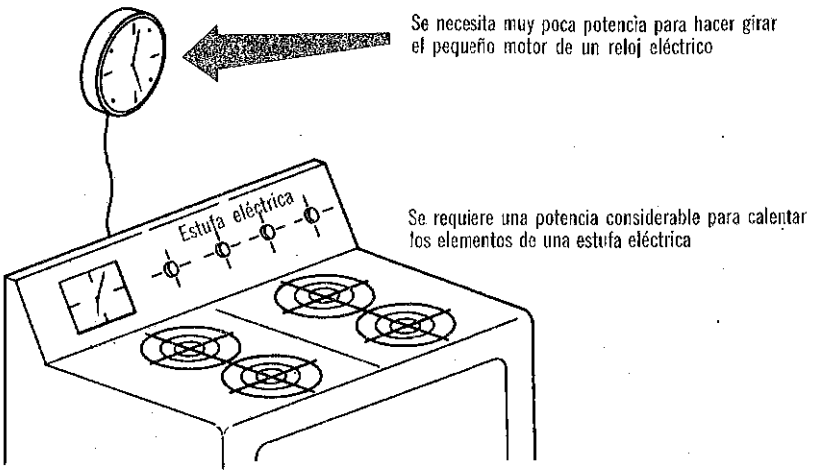
☐ Un diagrama de "conjunto" es útil para recordar cualquiera de las tres ecuaciones de la ley de Ohm. Cuando se cubre cualquiera de los símbolos, los dos símbolos restantes representan el miembro de la derecha de la ecuación (cantidades conocidas). El símbolo cubierto es el miembro de la izquierda de la ecuación (la cantidad incógnita).

preguntas de repaso

1. Enuncie la ley de Ohm y de las tres ecuaciones correspondientes.
2. Dibuje un circuito con una fuente de energía proporcionada por una batería de 15 volts y una carga resistiva de 5 ohms. ¿Cuál es la corriente que fluye a lo largo del circuito?
3. ¿Cuáles son las dos maneras en que puede duplicarse la corriente de la pregunta 2?
4. Si la resistencia de un circuito se aumenta a 4 veces su valor original, ¿qué tendría que hacerse con la tensión de la fuente para conservar el valor original de la corriente?
5. Un resistor de *película* de 100 ohms tiene una capacidad máxima de corriente nominal de 2 amperes. ¿Cuál es el valor máximo de la tensión de la fuente que se puede aplicar al circuito?
6. En la pregunta 5, ¿qué efecto tendría el aplicar una tensión de 50 volts al circuito?
7. ¿Qué es un *diagrama* de "conjunto"? Dé un ejemplo de cómo usarlo.
8. Si la resistencia de un circuito se reduce a $\frac{1}{4}$ de su valor original, ¿qué sucede a la corriente si la tensión de la fuente no cambia?
9. Si la resistencia de un circuito reduce hasta $\frac{1}{4}$ de su valor original, ¿qué cambio puede hacerse al circuito para conservar la corriente original?
10. Si se mantiene constante la tensión de la fuente, ¿qué efecto tiene en el circuito el duplicar la resistencia del mismo? Y si se mantiene constante la resistencia, ¿qué efecto tiene en la corriente el reducir la tensión de la fuente a la mitad? ¿Qué efecto tiene en la corriente el duplicar tanto la tensión de la fuente como la resistencia?

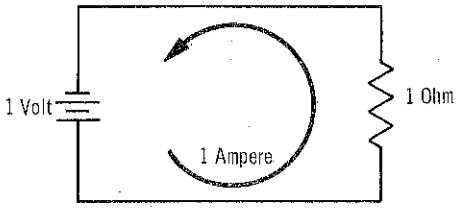
potencia

Como ya se sabe, el objeto de la fuente de energía en un circuito eléctrico es suministrar energía eléctrica a la carga. La carga aprovecha esta energía para desempeñar alguna función útil. Pero otra forma en que se puede expresar esto es decir que la carga aprovecha la energía de la fuente para efectuar *trabajo*. Al hacer trabajo, la carga consume energía. Esta es la razón por la que las baterías "se desgastan" y se tiene que cargarlas de nuevo o substituirlas. La cantidad de trabajo efectuado por una carga depende de la cantidad de energía alimentada a la carga y de la rapidez con que la carga utiliza esa energía alimentada a la carga y de la rapidez con que la carga utiliza esa energía. En otras palabras, usando cantidades iguales de energía, algunas cargas pueden efectuar más trabajo que otras en el mismo tiempo. Así pues, unas cargas trabajan más rápidamente que otras.



La potencia es el ritmo con que se efectúa el trabajo. Mientras más rápidamente se efectúe el trabajo, mayor potencia se consume

El término *potencia* se usa para referirse a la rapidez con que una carga puede efectuar un trabajo. Se puede definir como sigue: *la potencia es la cantidad de trabajo que una carga puede llevar a cabo en cierta cantidad estándar de tiempo, generalmente un segundo.* Un punto importante que debe tenerse presente es que el trabajo efectuado en un circuito eléctrico puede ser trabajo *útil* o *desperdiciado*. En ambos casos, la rapidez con que se efectúa el trabajo se mide en potencia. La operación de un motor eléctrico es trabajo útil, como lo es el calentamiento del elemento en una estufa eléctrica. Por otra parte, el calentamiento de los conductores de conexión o resistores en un circuito es trabajo desperdiciado, ya que el calor no desempeña ninguna función útil. Cuando se emplea potencia para un trabajo desperdiciado se dice que la potencia *se disipa*.



1 watt de potencia se consume cuando pasa un amper a través de una diferencia de potenical de 1 volt. Por lo tanto, en el circuito, se está consumiendo 1 watt de potencia.

la unidad de potencia

Puesto que la potencia es la rapidez con que se efectúa un trabajo, debe expresarse en unidades de *trabajo* y *tiempo*. Indudablemente que la unidad básica de tiempo es el segundo; sin embargo, puede no conocerse la unidad de trabajo. Para este curso, sólo se necesitará definir unidad de trabajo. En muchos libros de física se puede encontrar una descripción de cómo se despeja esta unidad.

La unidad de trabajo eléctrico es el *joule*, que representa la cantidad de trabajo efectuada por un *coulomb* por medio de una diferencia de potencial de 1 volt. Así pues, si se tiene un flujo de 5 coulombs por medio de una diferencia de potencial de 1 volt, se efectúan 5 joules de trabajo. Puede verse que el tiempo que tardan esos coulombs en fluir por medio de la diferencia de potencial no tiene influencia sobre la cantidad de trabajo efectuada. Si esto se hace en un segundo o en un año, el trabajo efectuado será de 5 joules.

Cuando se trabaja con circuitos es más conveniente operar con amperes en lugar de coulombs; y, según se dijo en el volumen 1, un ampere es igual a 1 coulomb que pasa por un punto en 1 segundo. Por lo tanto, usando amperes se tendrá que 1 joule de trabajo se efectúa en 1 segundo cuando un ampere pasa a través de una diferencia de potencial de 1 volt. Esta rapidez de 1 joule de trabajo en 1 segundo es la unidad básica de *potencia* y recibe el nombre de *watt*. Por lo tanto, *un watt es la potencia consumida cuando un ampere de corriente fluye a través de una diferencia de potencial de un volt.*

La potencia mecánica generalmente se mide en unidades de *caballos de fuerza* o *horsepower*, y se abrevia *hp*. Algunas veces es necesario efectuar la conversión de watts a caballos de fuerza, y viceversa. Para convertir de caballos de fuerza a watts, hay que multiplicar el número de caballos de fuerza por 746. Y para convertir de watts a caballos, dividir el número de watts entre 746.

CONVERSION DE UNIDADES
1 000 watts (w) = 1 kilowatt (kw)
1 000 000 watts (w) = 1 megawatt (Megaw)
1 000 kilowatts (kw) = 1 megawatt (Megaw)
1 watt (w) = 0.00134 caballo de fuerza (hp)
1 caballo de fuerza (hp) = 746 watts (w)

ecuaciones

De la definición de watt, se sabe que 1 watt es la potencia que se emplea cuando 1 ampere fluye a través de una diferencia de potencial de 1 volt. Así pues, cuando fluyen 2 amperes a través de una diferencia de potencial de 1 volt, se emplea una potencia de 2 watts. En otras palabras el número de watts empleados es igual al número de amperes de la corriente, multiplicado por la diferencia de potencial. En forma de ecuación, esto se expresa como sigue:

$$P = EI$$

donde P es la potencia consumida, en watts; E es la diferencia de potencial en volts e I es la corriente en amperes.

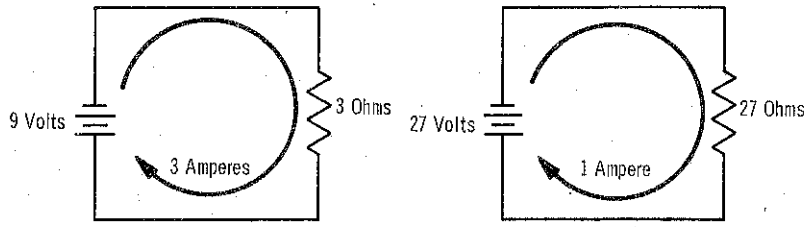
Algunas veces la ecuación recibe el nombre de ley de Ohm para potencia, debido a que es similar a la ley de Ohm. Con esta ecuación se puede encontrar la potencia empleada en un circuito o carga cuando se conocen los valores de corriente y tensión. Otras dos formas útiles de la ecuación, son

$$E = P/I$$

que se usa cuando se conocen la potencia y la corriente y se desea encontrar la tensión; y

$$I = P/E$$

que se aplica para determinar la corriente cuando se conocen la potencia y la tensión. Así, se concluye que gracias a estas tres ecuaciones se pueden calcular la potencia, la tensión o la corriente en un circuito, en tanto se conozcan los valores de las otras dos entidades.



Puesto que la ecuación de la potencia es P = EI, ambos circuitos emplean la misma potencia:

$$P = EI = 9 \text{ volts} \times 3 \text{ amperes} = 27 \text{ watts}$$

$$P = EI = 27 \text{ volts} \times 1 \text{ ampere} = 27 \text{ watts}$$

ecuaciones de resistencia

Habrá ocasiones en que se deberá encontrar la potencia en un circuito y todo lo que se conoce es la tensión y la resistencia. Ante todo, se aplicaría la ley de Ohm para encontrar la corriente del circuito, pero esto es muy laborioso. Es más fácil aplicar una ecuación que determine la potencia en función de *tensión* y *resistencia*. Puesto que las ecuaciones de potencia y la ley de Ohm son similares, se puede encontrar fácilmente la ecuación adecuada.

Se sabe que $P = EI$ y que $I = E/R$. De manera que en la ecuación de potencia se substituye a la I por su equivalente de la ley de Ohm, E/R, se tiene:

$$P = E \times (E/R) = E^2/R$$

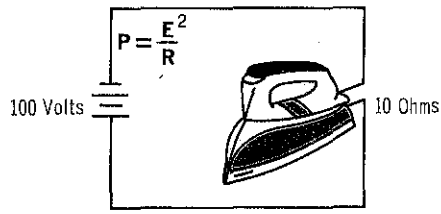
Gracias a esta ecuación, para calcular la potencia todo lo que se necesita conocer son la resistencia y la tensión. El término E^2 se lee "E cuadrada" y significa la multiplicación de E por sí misma.

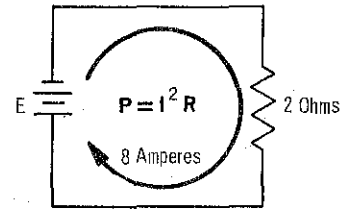
De la misma manera que se encontró la ecuación $P = E^2/R$, se puede obtener una ecuación dando la potencia en función de *corriente* y *resistencia*. Esta ecuación se aplica cuando se conoce la corriente y la resistencia y se quiere encontrar la potencia. Para hallar esta ecuación, se usa $E = IR$. Cuando se combinan, se tiene:

$$P = IR \times I = I^2R$$

Se necesitan dos pasos para determinar la potencia que se emplea en el primer circuito de abajo, mediante las ecuaciones de la página 2-46. ¿Cómo se podría hacer ahora en sólo un paso? Puesto que potencia es la incógnita y las variables conocidas son la tensión y la resistencia, debe usarse la ecuación que relaciona la potencia con la tensión y la resistencia, Dicha ecuación es la siguiente:

$$P = E^2/R = (100)^2/10 = (100 \times 100)/10 = 1{,}000 \text{ watts}$$





¿Cuál es la potencia empleada en el segundo circuito? Ahora se aplicaría la ecuación $P = I^2R$, ya que se conocen la corriente y la resistencia:

$$P = I^2R = 8 \times 8 \times 2 = 128 \text{ watts}$$

pérdidas de potencia

La potencia empleada en un circuito indica la cantidad de trabajo efectuado en ese circuito. Pero se recordará que este trabajo no siempre es útil porque gran parte de él es desperdiciado o perdido. La potencia que se emplea para alimentar trabajo no utilizado, por lo tanto, es potencia perdida o *disipada.* En función de la fuente de potencia, la potencia perdida representa energía eléctrica que no se aprovecha productivamente. Y, como ya se sabe, la producción de energía eléctrica, ya sea por medio de una batería o por un generador eléctrico, cuesta dinero. Por lo tanto, conviene que las pérdidas de potencia en cualquier circuito eléctrico se mantengan en su valor mínimo posible.

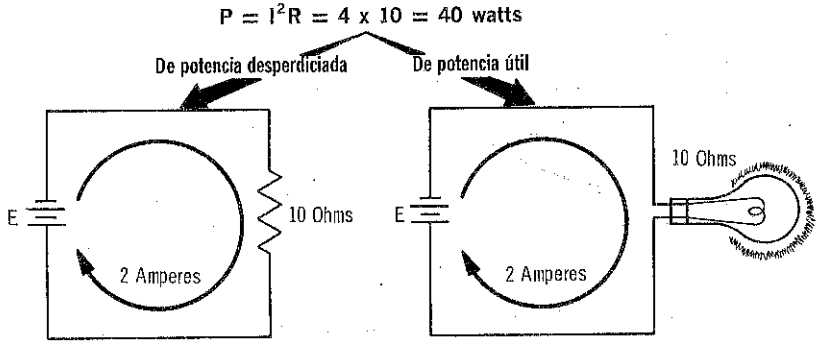
Las pérdidas más comunes de potencia en un circuito eléctrico son las que ocurren en forma de calor cuando una corriente fluye a través de una resistencia. La relación exacta entre las tres cantidades: calor, corriente y resistencia, la representa la siguiente ecuación de potencia:

$$P = I^2R$$

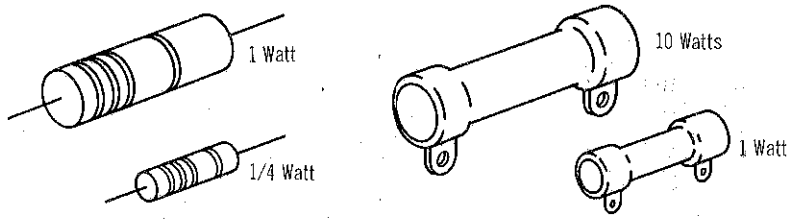
donde P es la rapidez con que se produce calor. Se puede ver de la ecuación, que puede reducirse la cantidad de calor producida, reduciendo ya sea la corriente o la resistencia.

Este calentamieneto I^2R —como se le llama con frecuencia— ocurre tanto en los conductores del circuito, como en los resistores. Suele ser muy pequeño en los conductores, ya que tanto los materiales como los calibres de los conductores se usan de manera que tengan valores de resistencia pequeños. En un resistor, es poco lo que puede hacerse en relación con el calentamiento I^2R, ya que la corriente del circuito, así como el valor de resistencia del resistor, generalmente no se pueden cambiar sin afectar la operación del circuito.

En algunos aparatos eléctricos, como tostadores y planchas, se requiere calentamiento I^2R, por lo que éste no representa una pérdida de potencia.



El calentamiento I^2R se representa generalmente en potencia desperdiciada. Algunas veces, sin embargo, efectúa trabajo útil



Con frecuencia, las clasificaciones de potencia no están marcadas en los resistores sino indicadas en su tamaño físico. Sin embargo, los tamaños usados para potencias particulares no sólo varían entre diferentes tipos de resistores, sino también entre fabricantes, de manera que puede ser difícil juzgar la clasificación de potencia. Debe consultarse la lista de características del fabricante.

clasificación de los resistores por potencia

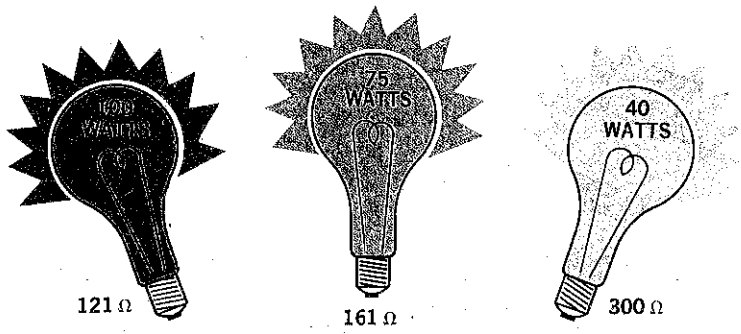
En la página 2-26 se vio que si fluye demasiada corriente a través de un resistor, el calor causado por esta corriente dañará o destruirá al resistor. El calor lo causa el calentamiento I^2R, que, como se sabe, son pérdidas de potencia expresadas en watts. Por lo tanto, todo resistor tiene una clasificación de *wattaje* o *potencia,* para indicar la cantidad de calor I^2R que puede resistir sin quemarse. Esto significa que un resistor con una clasificación de potencia de 1 watt se quemará si se emplea en un circuito en el cual la corriente lo haga disipar un calor superior al de 1 watt. Si se conoce la capacidad de potencia de un resistor y se desea saber cuál es la corriente máxima que puede tolerar, puede aplicarse una ecuación que se obtiene a partir de $P = I^2R$:

$P = I^2R$ se puede convertir en $I^2 = P/R$ que se puede convertir en $I = \sqrt{P/R}$. Gracias a esta ecuación es posible encontrar la corriente máxima que puede tolerar un resistor de 1 ohm con una clasificación de potencia de 4 watts:

$$I = \sqrt{P/R} = \sqrt{4/1} = \sqrt{4} = 2 \text{ amperes}$$

Si este resistor conduce más de 2 amperes, disipará más de su potencia nominal y, por lo tanto, se quemará.

Las potencias nominales asignadas por los fabricantes de resistores suelen basarse en resistores montados en un local abierto, con circulación libre de aire y en donde la temperatura no sea superior a 40 grados C. Por lo tanto, si un resistor está montado en un espacio cerrado, aglomerado, o donde la temperatura sea superior a 40 grados C, es muy probable que se queme aun sin exceder su clasificación de potencia. Además, algunos resistores están diseñados para instalarse a una caja o marco, que sirve como disipador térmico, y que elimina el calor producido. Si estos tipos de resistores se montan al aire libre, su calor no será eliminado y, por ende, se calentará demasiado.



La potencia de una lámpara indica qué tan brillante será esta lámpara cuando se usa en un circuito. En realidad, constituye una medida del calentamiento I^2R del filamento de la lámpara, que depende de la resistencia del filamento

clasificación de potencia de las lámparas incandescentes

Según se dijo en el volumen 1, una lámpara incandescente está formada por un elemento de resistencia, llamado filamento, encerrado en una cápsula de vidrio. Cuando la lámpara se conecta a un circuito la corriente fluye a través del filamento, y ocurre un calentamiento en la forma I^2R. El calor es tan fuerte que el filamento se calienta al rojo blanco, irradiando luz. Cuanto *más* se caliente un filamento, *más* luz dará la lámpara. Puede verse que una forma conveniente de clasificación de focos eléctricos es de acuerdo con el calentamiento o consumo I^2R que produce. Esto es lo que se hace en las fábricas comerciales de focos eléctricos. Sobre cada foco se graba el valor de calentamiento I^2R expresado en watts, que se producirá cuando el foco se conecte a una fuente estándar de potencia. Luego, cuando se compra un foco eléctrico según su clasificación de consumo, en realidad se está seleccionando según la cantidad de luz que produce.

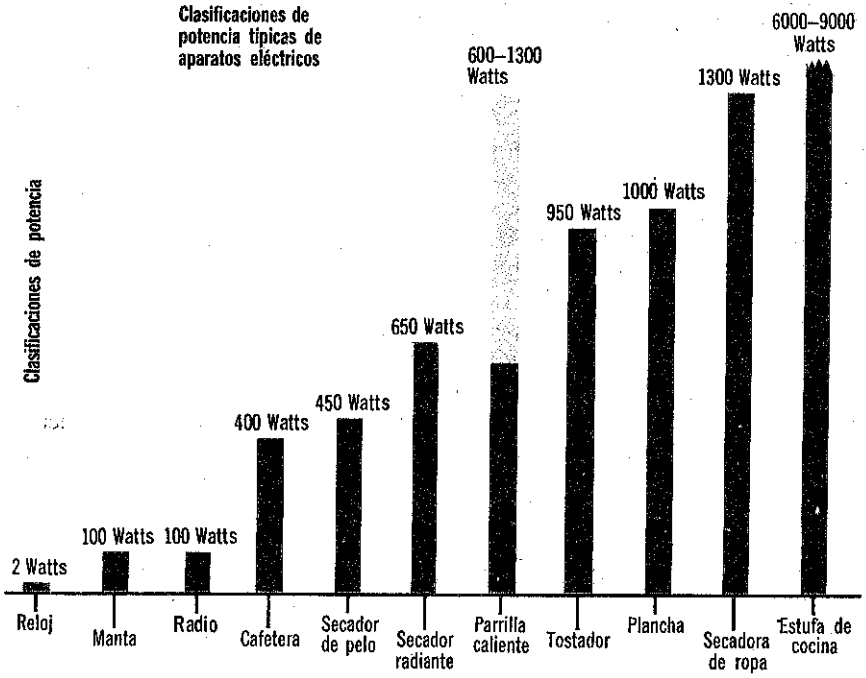
Cabría preguntarse cuál es la diferencia física que hay entre un foco de 40 watts y otro de 100 watts. Puede apreciarse en la ecuación $P = EI$ que por el foco de mayor potencia fluye una mayor cantidad de corriente a través de su filamento, o bien está conectado a una fuente de tensión más alta, o quizás ambas cosas. Sin embargo, se sabe que en la mayor parte de los casos, en el hogar por ejemplo, la fuente de tensión está determinada por las compañías de electricidad y no se puede cambiar. Esto significa que el foco de 100 watts debe conducir mayor corriente. Para ello, debe tener una resistencia más baja que el de 40 watts. Así pues, el consumo (en watts) y, por lo tanto, la intensidad de luz que produce una lámpara eléctrica depende de la resistencia del filamento de la lámpara. Mientras *más alta sea la resistencia, más baja será la potencia nominal* y *cuanto más baja sea la resistencia, más alta será la potencia nominal.*

clasificaciones típicas de consumo

Según se ha visto, las clasificaciones de consumo de potencia usadas para resistores y focos eléctricos son expresiones del calentamiento I^2R que tiene lugar. Aunque la clasificación de potencia siempre significa calentamiento I^2R, su significado *práctico* es diferente de acuerdo con los aparatos de que se trate.

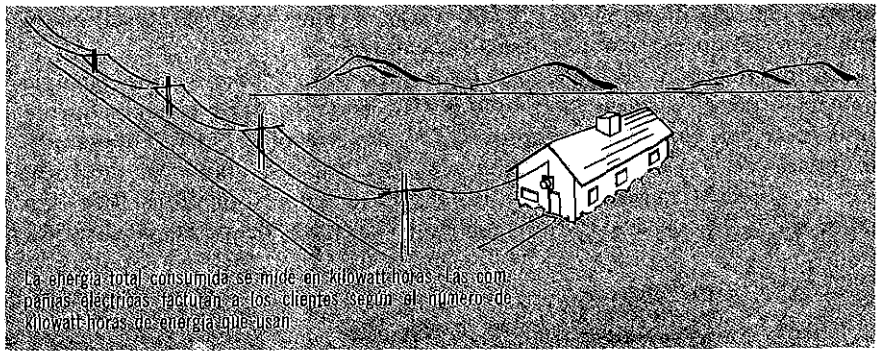
Muchos otros dispositivos eléctricos se seleccionan sobre la base de sus clasificaciones de potencia de consumo, especialmente aquellos que usan calor para funcionar. Estos pueden ser planchas, tostadores, calentadores, estufas, etc. Para la mayor parte de estos aparatos, cuanto mayor sea su consumo de potencia, mayor cantidad de calor se produce. Esto significa que, por ejemplo, un calentador eléctrico de 1,500 watts emite más calor que un calentador de 1,000 watts y, por lo tanto, calienta un área mayor. Sin embargo, no siempre son mejores los aparatos que tienen más alta clasificación de consumo de potencia. Se podrían fabricar tostadores con clasificación de 10,000 watts o más, pero no tostarían el pan, sino lo quemarían casi instantáneamente.

La clasificación de potencia de equipo de trabajo —por ejemplo motores— no se basa en las pérdidas I^2R. Estos se basan principalmente en la potencia que pueden aprovechar para efectuar trabajo mecánico. un motor de *1 caballo de fuerza* usa 746 *watts* de potencia eléctrica, más la potencia necesaria para disipación debido a pérdidas I^2R. Un motor de ¼ hp necesita por lo menos 186.5 watts de potencia eléctrica.



el kilowatt-hora

Prácticamente toda la electricidad que se consume es producida o generada por grandes compañías eléctricas. A partir de las estaciones generadoras, la electricidad se distribuye a los usuarios por medio de complicadas redes de alambre, cables y otros aparatos. Este sistema de distribución termina en las fábricas, tiendas o casas particulares donde la electricidad debe consumirse. Puesto que las compañías eléctricas venden electricidad, deben tener alguna forma de saber *cuánta* electricidad consume cada uno de sus clientes. De otra manera, no tendrían forma de saber cómo facturar. Esto lo hacen por medio de un medidor de energía para cada consumidor. El medidor suele ubicarse en el punto de entrada de la electricidad al hogar, apartamento o fábrica, y mide la energía eléctrica que se consume.



La energía total consumida se mide en kilowatt-horas. Las compañías eléctricas facturan a los clientes según el número de kilowatt-horas de energía que usan.

En sí misma, la electricidad no se puede medir ya que, como se sabe, es sólo un fenómeno. La corriente y la tensión se pueden medir; pero, como se verá más tarde, hacer la factura para un usuario sobre la base de corriente o tensión solos, es impráctico. Más bien, a cada cliente se le carga sobre la base de cuánto *trabajo* efectúa la energía eléctrica que consume.

Se recordará que la rapidez con que se hace trabajo se mide en watts. Así pues, para determinar el *trabajo total* efectuado, que es lo mismo que la potencia total consumida, se multiplica la rapidez de ejecución del trabajo (watts) por el tiempo total durante el cual se efectúa trabajo. Así pues, si una lámpara de 100 watts está encendida una hora, el trabajo total es 100 watts multiplicado por una hora, o 100 watts-hora. Esta es, pues, la forma en que las compañías eléctricas miden y facturan el consumo de energía eléctrica.

El watt-hora es una unidad muy pequeña. Si se usara para indicar la potencia total consumida, resultarían cifras muy elevadas. En lugar de ello se utilizan unidades de *kilowatt-hora*. Cada kilowatt-hora es igual a mil watts-hora.

resumen

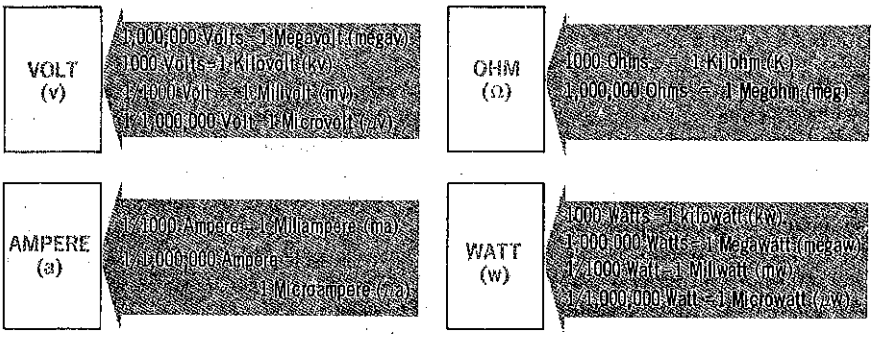
☐ La potencia indica la rapidez con que una carga puede hacer trabajo; es decir, la cantidad de trabajo que puede efectuarse en una cantidad estándar de tiempo. ☐ La unidad de trabajo eléctrico es el joule, que es la cantidad de trabajo efectuada por un coulomb que fluye a través de una diferencia de potencial de 1 volt. La unidad de tiempo usada es el segundo. ☐ Una unidad eléctrica básica de potencia es 1 joule de energía consumida por segundo. A esto se le llama watt. El watt se puede expresar también como potencia usada cuando fluye una corriente de 1 ampere a través de una diferencia de potencial de 1 volt. ☐ La unidad de potencia mecánica es el caballo de fuerza (hp). ☐ Un caballo es igual a 746 watts.

☐ La potencia se puede calcular en función de la tensión, la corriente y la resistencia, mediante tres ecuaciones: $P = EI$, $P = I^2R$, y $P = E^2/R$. ☐ Estas tres ecuaciones se pueden reordenar para despejar tensión, corriente y resistencia: $E = P/I$ ó $E = \sqrt{PR}$; $I = P/E$ ó $I = \sqrt{P/R}$; y $R = E^2/P$ ó $R = P/I^2$. ☐ El trabajo efectuado en un circuito eléctrico puede ser trabajo útil o desperdiciado. Cuando se emplea potencia para trabajo desperdiciado se dice que la potencia se disipa. ☐ Las pérdidas de potencia (potencia disipada) generalmente tienen la forma de calor y se le llama calentamiento I^2R.

☐ Las clasificaciones de potencia o de consumo de los resistores generalmente se entienden a 40 grados C y en espacio abierto. Estas condiciones deben tenerse presentes cuando se monta un resistor. ☐ Las clasificaciones de consumo de las lámparas incandescentes están determinadas por la resistencia del filamento. Cuanto más alta sea la clasificación de potencia, menor será la resistencia. ☐ La cantidad de luz que una lámpara incandescente emite depende de su clasificación de potencia. Cuanto más alta sea la clasificación de potencia, mayor cantidad de luz producirá. ☐ Las unidades de trabajo eléctrico o energía son las que usan las compañías de electricidad para medir y facturar electricidad. La unidad básica es el watt-hora; pero es más conveniente el kilowatt-hora (mil veces mayor).

preguntas de repaso

1. Defina: *joule, watt, watt-hora* y *kilowatt-hora.*
2. ¿Cuántos joules hay en 1 kilowatt-hora?
3. Dibujar un diagrama de "conjunto" para P, E e I.
4. Cierto motor consume 1,492 watts. ¿Cuál es su clasificación en hp? ¿cuáles en kw?
5. Si se desea tener más luz en una habitación, ¿deberá usarse un foco con un consumo menor o mayor? ¿Por qué?
6. ¿Qué significa la expresión *pérdida* I^2R?
7. ¿Cuál es la ecuación utilizada para encontrar P, si se dan E e I?
8. ¿Cuál es la ecuación para determinar E, si se conocen P y R?
9. ¿Cuál es la ecuación para determinar I, si se conocen R y P?
10. ¿Cuál es la ecuación para determinar R, si se conocen P y E?



Con frecuencia, las unidades básicas de volt, ohm, ampere y watt son, o bien demasiado grandes, o demasiado pequeñas para su uso práctico. Se usan entonces, valores fraccionales o múltiplos de las unidades:

mega = 1,000,000; kilo = 1000; Mili = 1/1000; y micro = 1/1,000,000

unidades eléctricas básicas

Según lo aprendido hasta ahora, se concluye que en todo circuito de c-c existen cuatro cantidades eléctricas con las cuales se trabajará con mayor frecuencia. Estas son: 1) la *tensión* de la fuente aplicada al circuito; 2) la *resistencia* que hay en el circuito; 3) la *corriente* que fluye en el circuito, y 4) la *potencia* consumida en el circuito. Las unidades en que normalmente se expresan estas cantidades constituyen lo que se llama sistema práctico de unidades. Son las siguientes:

Cantidad	*Unidad*
Tensión	Volt
Resistencia	Ohm
Corriente	Ampere
Potencia	Watt

El *volt* se define en función del trabajo eléctrico como sigue: cuando una fem hace pasar un coulomb de electrones (6.28 billones de electrones) para producir un joule de trabajo la fem tiene una diferencia de potencial de 1 volt.

El *ampere* se define en función de la carga, expresada en coulombs. Una corriente de 1 ampere fluye cuando una carga de 1 coulomb pasa por un punto dado en un segundo. Es decir, el ampere es una medida de rapidez de flujo.

El *ohm* se define en función del volt y del ampere. Un material tiene una resistencia de 1 ohm cuando una fem 1 volt causa el flujo de corriente de 1 ampere a través de él.

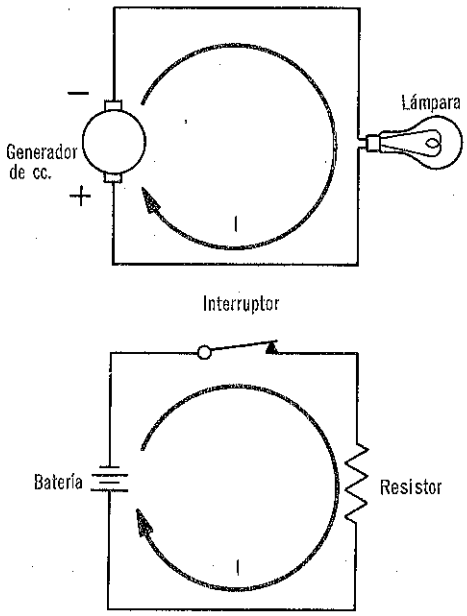
El *watt* se define también en función del volt y del ampere. Es la potencia que se consume cuando fluye una corrienete de 1 ampere a través de una diferencia de potencial de 1 volt.

circuitos en serie

Hasta ahora se ha visto que los elementos básicos del circuito eléctrico son la fuente de potencia, la carga y los conductores de conexión. Se sabe que la fuente de potencia produce energía en la forma de tensión y que esta tensión causa el flujo de corriente en el circuito. También se sabe que la resistencia en el circuito, ya sea la resistencia de la carga o de los conductores, se opone al flujo de corriente. Además, se ha visto que la carga consume energía eléctrica para efectuar alguna función útil. Esta es la forma en que se ha presentado el circuito básico, sus partes y su finalidad. Una vez que se comprende el circuito básico, se han explicado las relaciones que existen entre tensión, corriente, resistencia y potencia.

A lo largo de la presentación de este material, todos los circuitos descritos han tenido una cosa en común. Es decir, había *una* y sólo una *trayectoria* que podía seguir la corriente de la terminal negativa de la fuente de potencia, a través del circuito, regresando a la terminal positiva de la fuente. *Nunca* se observó ningún punto en un circuito donde la corriente pudiera dividirse para seguir más de una trayectoria. En consecuencia, por todas las partes o dispositivos del circuito siempre fluía la misma corriente.

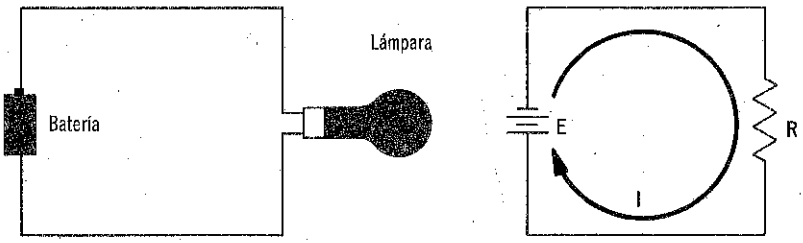
A este tipo de circuito de una sola trayectoria se le llama *circuito en serie*.



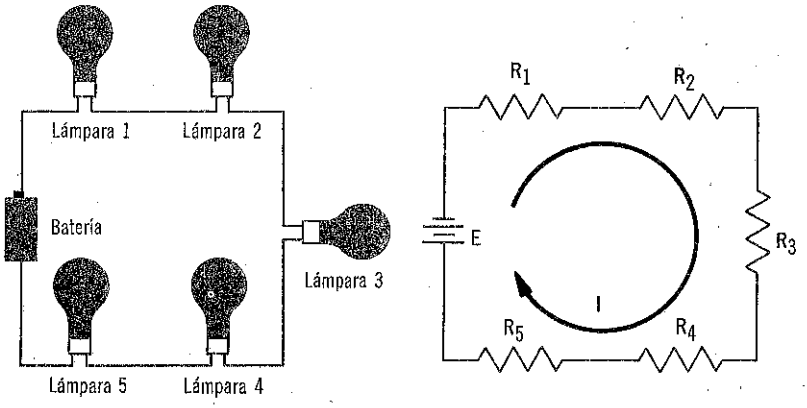
En un circuito en serie se tiene la misma corriente en todas sus partes, no importa cuántas partes o aparatos haya. En tanto pase corriente idéntica a través de todos ellos, se trata de un circuito en serie.

carga en serie

Hasta ahora, se han estudiado circuitos con una sola carga, por ejemplo un resistor o un foco eléctrico. La resistencia de esta carga única ha sido la resistencia total del circuito y la potencia consumida en el circuito era la potencia que esa carga consumía. Sin embargo, en la práctica se encontrará frecuentemente que un circuito tiene más de una carga. Puede tener dos resistores, o un resistor y una lámpara, o quizás cinco resistores y dos lámparas. De hecho, prácticamente no hay límite para el número de cargas que puede tener un circuito.



Previamente, se han examinado circuitos con una sola carga. La resistencia total del circuito era la potencia usada por la carga



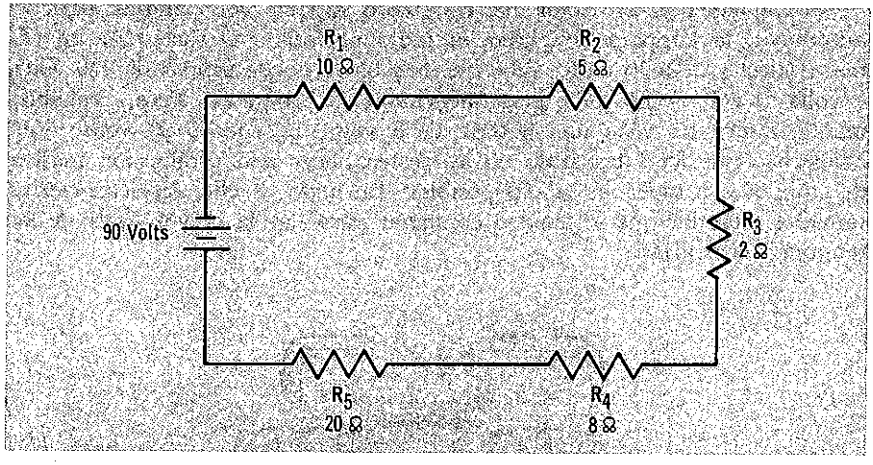
Puede usarse más de una carga en un circuito. Si la corriente total (I) fluye en cada una de ellas, se trata de cargas en serie.

Si las cargas se conectan en el circuito de manera que por cada una de ellas pasa la corriente total del circuito, están conectadas *en serie* y se llaman *cargas en serie*.

forma en que las cargas en serie afectan la corriente

La corriente que fluye en un circuito depende de la tensión de la fuente y de la *resistencia total del circuito*. Cuando sólo hay una carga en el circuito, ésta suministra generalmente toda la resistencia del circuito. Sin embargo, cuando se usan varias cargas en serie, la resistencia total del circuito es la *suma* de las resistencias de cada una de las cargas. Así pues, si un circuito tiene 5 cargas conectadas en serie y cada carga es un resistor de 10 ohms, la resistencia total del circuito es de 5 por 10, o sea 50 ohms.

Para determinar la corriente en un circuito que contiene cargas en serie, primero se obtiene la resistencia total del circuito, sumando la resistencia de cada una de las cargas; luego, se usa la ley de Ohm ($I = E/R$) para determinar la cantidad de corriente.



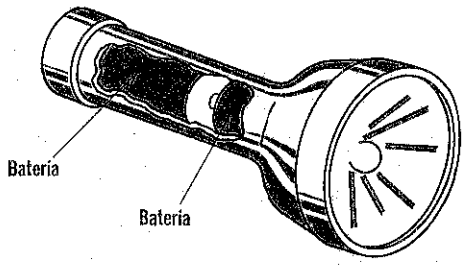
Puesto que el flujo de corriente depende de la resistencia total del circuito y para un circuito serie la resistencia total se obtiene sumando las resistencias de las cargas individuales, para este circuito:

$$\begin{aligned} R_{TOT} &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \\ &= 10 + 5 + 2 + 8 + 20 \\ &= 45 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Una vez que se conoce la resistencia total, se puede usar la ley de Ohm para determinar la cantidad de corriente del circuito:

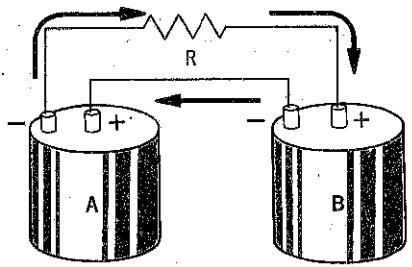
$$\begin{aligned} I &= E/R_{TOT} \\ &= 90 \text{ volts}/45 \text{ ohms} \\ &= 2 \text{ amperes} \end{aligned}$$

fuentes de energía en serie



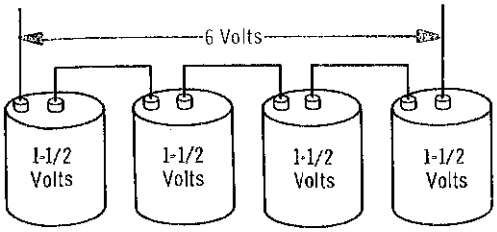
Frecuentemente, la tensión requerida para la operación de un aparato o circuito es mayor que el de cualquier fuente de potencia disponible. En estos casos, las fuentes de potencia se pueden usar en serie para dar la tensión necesaria. Un ejemplo de esto es la lámpara de mano de baterías común

Probablemente, el lector ha comprado alguna vez baterías para el automóvil, la lámpara de mano, el radio portátil o el foco para su cámara (flash). Por lo tanto, sabe que hay baterías con salidas de 1½ volts, 6 volts, 9 volts y 12 volts, para mencionar sólo algunas. Pero, probablemente, nunca ha visto una batería de 3 volts, 15 volts o 29 volts; esto obedece a que los fabricantes no les costea hacer una producción masiva de baterías con todas las salidas posibles. En lugar de ello, fabrican ciertos tamaños estándar que se pueden combinar para dar la mayor parte de las tensiones necesarias.



Cuando se usan dos o más baterías en un circuito para producir una tensión mayor que la de una sola batería, se dice que las baterías están conectadas en serie. Esto produce *fuentes de energía en serie.*

Cuando se conectan dos baterías en serie, la terminal negativa de una se conecta a la terminal positiva de la otra. Y las otras dos terminales se conectan al circuito. Como se muestra, la corriente sale de la terminal negativa de la batería A, recorre el circuito y entra por la terminal positiva de la batería B. Luego, sale de la terminal negativa de B, y regresa a la terminal positiva de A.

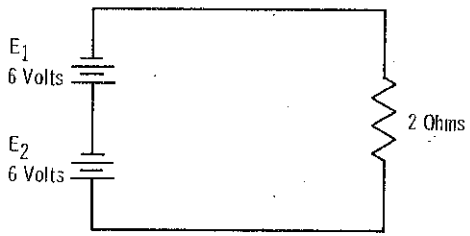


$E_{TOT} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$
$= 1\text{-}1/2 + 1\text{-}1/2 + 1\text{-}1/2 + 1\text{-}1/2$
$= 6$ Volts

Para fuentes de potencia conectadas en serie, en la misma dirección la salida de tensión total es la suma de las tensiones de las fuentes individuales

forma en que las fuentes de energía en serie afectan la corriente

Cuando se conectan en serie las fuentes de energía, la tensión *total* es igual a la *suma* de las tensiones de las fuentes *individuales.* Para determinar la cantidad de corriente en un circuito que contenga fuentes de potencia conectadas en serie, debe, por lo tanto, obtenerse antes la tensión total de la fuente. Luego se aplica la ley de Ohm ($I = E/R$) para calcular la corriente.

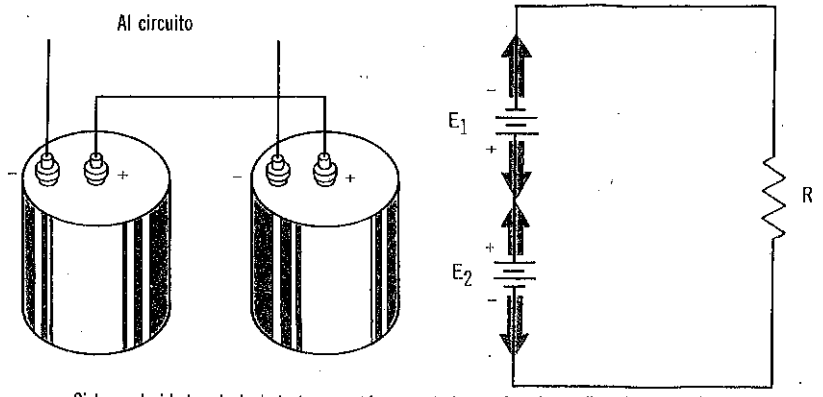


Para el circuito anterior con fuentes de energía en serie, la tensión total de la fuente es la siguiente:

$$E_{TOT} = E_1 + E_2$$
$$= 6 + 6$$
$$= 12 \text{ volts}$$

Para calcular la corriente,

$$I = E_{TOT}/R$$
$$= 12 \text{ volts}/2 \text{ ohms}$$
$$= 6 \text{ amperes}$$



Si las polaridades de la batería no están conectadas en la misma dirección, estarán en oposición serie y se restarán, por lo tanto,

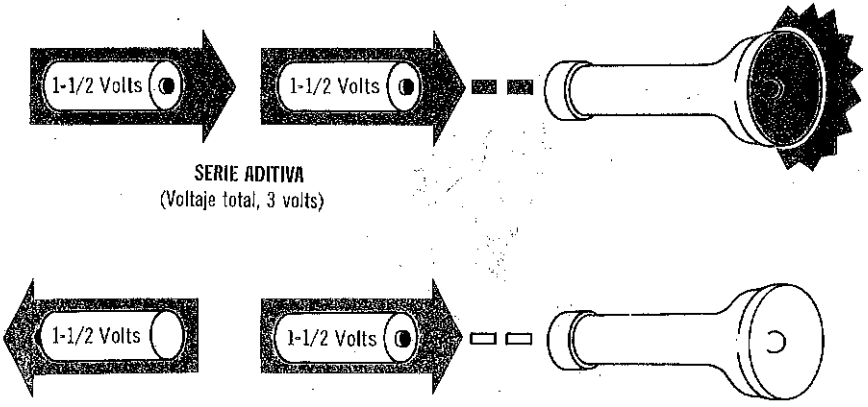
$$E_{TOT} = E_1 - E_2$$

fuentes de energía en oposición serie

Si las fuentes de energía se conectan de manera que sus polaridades no se encuentran en la misma dirección, estarán en oposición. Cuando las fuentes de energía están conectadas en esta forma, se dice que están en oposición y conectadas en serie. La tensión *total* de fuentes en oposición conectadas en serie es igual a la *diferencia* de las tensiones *particulares.*

$$E_{TOT} = E_{MAYOR} - E_{MENOR}$$

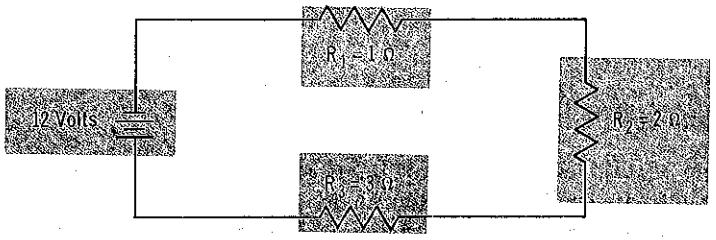
La polaridad de la tensión total de la fuente será la misma que la de la batería mayor pero si ambas baterías tienen la misma tensión, entonces E_{TOT} será cero, y no habrá flujo de corriente.



consumo de potencia

La potencia es la rapidez con que una carga efectúa trabajo. Cuando sólo hay una carga en el circuito, la potencia que consume esa carga es la potencia total consumida en el circuito. Cuando un circuito tiene varias cargas conectadas en serie, cada una de las cargas consume cierta potencia. Por lo tanto, la potencia total consumida en el circuito es la suma de los consumos de cada carga.

La potencia total de un circuito en serie se puede encontrar de dos maneras. Una consiste en calcular la potencia que consume cada carga y luego sumar todas las potencias consumidas por las cargas. La segunda es más sencilla y consiste en encontrar la resistencia total del circuito y luego calcular la potencia que consume la resistencia total.



Para encontrar la cantidad de potencia que consume cada una de las cargas del circuito, primero debe conocerse la cantidad de corriente que pasa a través del circuito. Sin embargo, para determinar la cantidad de corriente, primero debe obtenerse la resistencia total.

Cálculo de la resistencia total del circuito:

$$R_{TOT} = R_1 + R_2 + R_3 = 1 + 2 + 3 = 6 \text{ ohms}$$

Cálculo de la corriente del circuito:

$$I = E/R_{TOT} = 12 \text{ volts}/6 \text{ ohms} = 2 \text{ amperes}$$

Cálculo de la potencia consumida por cada carga:

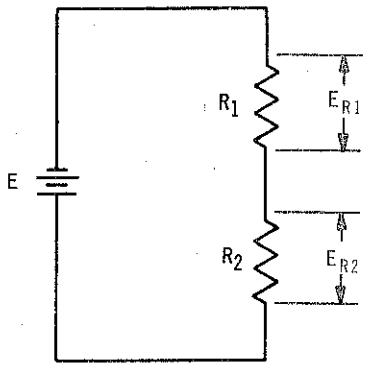
$$P = I^2R$$
$$P_1 = 2 \times 2 \times 1 = 4 \text{ watts}$$
$$P_2 = 2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ watts}$$
$$P_3 = 2 \times 2 \times 3 = 12 \text{ watts}$$

Cálculo de la potencia total del circuito:

$$P_{TOT} = P_1 + P_2 + P_3 = 4 + 8 + 12 = 24 \text{ watts}$$

La potencia total del circuito también se podría haber determinado más simplemente, mediante la siguiente ecuación:

$$P_{TOT} = EI = 12 \text{ volts} \times 2 \text{ amperes} = 24 \text{ watts}$$



La tensión total suministrada por una fuente se elimina en la resistencia de circuito. Puede considerarse la caída de voltaje ya sea como una pérdida de energía del flujo de electrones o como trabajo efectuado por la corriente cuando fluye a través de la resistencia. La energía perdida generalmente se entrega en forma de calor. La caída total de voltaje es igual al voltaje de la fuente:

$$E_{FUENTE} = E_{R1} + E_{R2}$$

caída de tensión

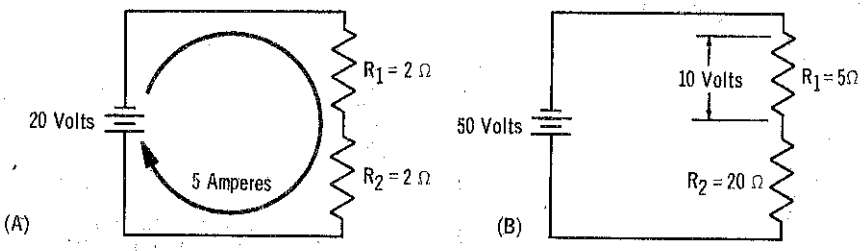
Como se dijo en el volumen 1, en una batería se establece una diferencia de potencial entre las terminales positiva y negativa. Esto sucede cuando químicamente se produce un *exceso de electrones* en la *terminal negativa* y la correspondiente falta o exceso de cargas positivas —en la terminal positiva—. Cuando un alambre o cualquier material conductor se conecta a las terminales, la diferencia de potencial origina un campo de fuerza —que en esta obra se llamará fuerza— el cual pasa por el alambre a la velocidad de la luz. Entonces, los electrones fluyen y salen de la terminal negativa, pasan a través del alambre y regresan a la terminal positiva siendo impulsados por la presión de la fuerza. Debido a la acción química por cada electrón que sale de la terminal negativa, en la batería hay uno nuevo que lo reemplaza. Así, aunque haya flujo de electrones, la batería mantiene constante su diferencia de potencial.

Cada electrón de la terminal negativa de la batería recibe energía de ésta. Cuando el electrón recorre el circuito, transmite la energía, de manera que, cuando llega a la terminal positiva, ha perdido toda la energía que la batería le había dado. El electrón pierde su energía cediéndola a la resistencia del circuito, generalmente en forma de calor.

Puesto que la diferencia de potencial entre las terminales de la batería normalmente se indica en volts, la energía perdida por los electrones en la resistencia del circuito también se expresa en volts. Por lo tanto, si un resistor se conectara a una batería de 10 volts, se perderían 10 volts, o constituiría una *caída,* debido a la corriente que fluye por el resistor. Si se conectan dos o más resistores en la batería, parte de la tensión tiene una caída en cada resistor; pero la caída de tensión total seguiría siendo de sólo 10 volts. Por lo tanto, la caída de tensión total siempre es igual a la tensión de la fuente.

cálculo de la caída de tensión

En un circuito en serie, la caída de tensión *total* de todas las cargas es igual a la tensión de la fuente. Esto ocurre independientemente de que se tengan una o cincuenta cargas. Por lo tanto, para una tensión fija de la fuente, cuantas más cargas haya, menor será la caída de tensión en cada una de ellas. Puesto que la *caída de tensión* en cualquier carga es la energía suministrada a la carga, la caída de tensión depende de la *corriente* que fluye a través de la carga y de la *resistencia*, mayor será la caída de tensión. Y, mientras menor sea la corriente o más baja la resistencia, menor será la caída de tensión. Lo anterior se representa por la ecuación E = IR. Se recordará que ésta es una de las ecuaciones de la ley de Ohm y que indica las relaciones que hay entre la corriente, la tensión y la resistencia de cada uno de los componentes del circuito, así como de circuitos completos.



Para el circuito A, la caída de tensión en R_1 es

$$E_{R1} = IR_1 = 5 \text{ amperes} \times 2 \text{ ohms} = 10 \text{ volts}$$

Como se sabe que la caída de tensión en R_1 es de 10 volts y que la caída total debe ser igual a la tensión de la fuente, entonces la tensión restante debe encontrarse en Rz. Esto se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$E_{R2} = E_{TOT} - E_{R1} = 20 - 10 = 10 \text{ volts}$$

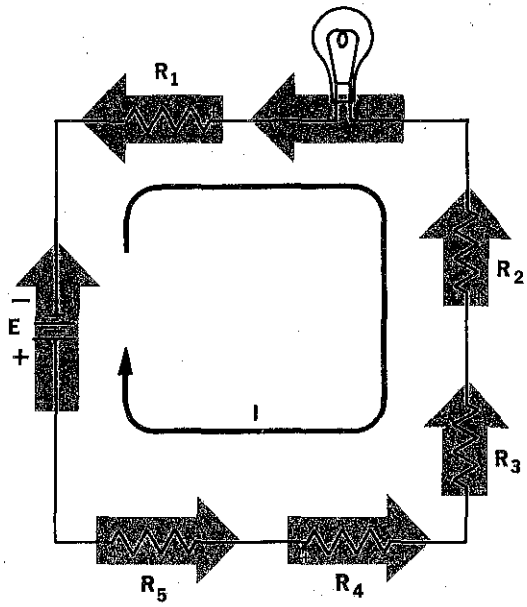
Por lo tanto las caídas de tensión en R_1 y R_2 son iguales: 10 volts para cada una. Esto es lógico, ya que ambas tienen la misma resistencia y la corriente que fluye a través de ellas es la misma.

Como lo muestra el circuito B, algunas veces se puede conocer la resistencia de una carga, así como la caída de tensión en ella y se pide encontrar la corriente. Esto se haría mediante la ecuación I = E/R. Por lo tanto, la corriente en R_1 es

$$I = E_{R1}/R_1 = 10 \text{ volts}/5 \text{ ohms} = 2 \text{ amperes}$$

polaridad

Se recordará que todas las tensiones y corrientes tienen polaridad y magnitud. En un circuito en serie sólo hay una corriente y su polaridad es de la terminal negativa de la batería, a través del circuito, a la terminal positiva de la batería. Las caídas de tensión en las cargas también tienen polaridades. La manera más sencilla para encontrar estas polaridades, es tomar como base la dirección de la corriente electrónica. Luego, cuando la corriente de electrones entra a la carga, la tensión es negativa; y cuando sale, la tensión es positiva. Esto ocurre independientemente de cuántas cargas existan en el circuito o cuál sea su tipo.



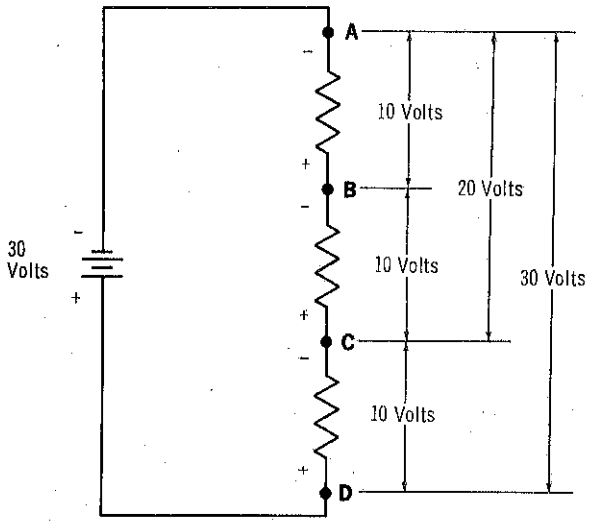
Las caídas de tensión se oponen a la tensión de la fuente

La corriente entra al lado negativo de una carga y sale por el positivo. El flujo de corriente es de negativo a positivo dentro de las cargas y de positivo a negativo dentro de las fuentes de poder. Esto se puede explicar por la energía de las cargas que fluyen. Dentro de la fuente, su energía es aumentada en tanto que dentro de las cargas disminuye su energía

La caída en la carga es opuesta a la de la fuente. Las caídas de tensión se oponen a la tensión de la fuente y la reducen para las otras cargas. Esto se debe a que cada carga consume energía, dejando menos energía para las demás cargas.

polaridad y tensión de un punto

Fuera de la fuente de energía, la corriente fluye siempre de negativo a positivo. Al estudiar la ilustración de la página 2-64, cabe preguntarse si esto es siempre igual, ya que las polaridades parecen indicar que entre las cargas la corriente fluye de positivo a negativo. En realidad, cada par de polaridades se aplica sólo a la carga a la que corresponden. Los signos más y menos en una carga no tienen relación con los de cualquiera otra carga. Si se observa la ilustración, esto resultará claro.



Existe una tensión entre dos puntos. Estos puntos deben ser especificados antes de poder determinar dicha tensión

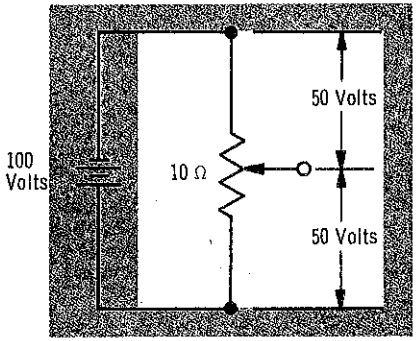
Un punto es positivo o negativo sólo en relación con otro punto. Con mucha frecuencia, un punto es positivo con respecto a un segundo punto y, al mismo tiempo, negativo con respecto a un tercero

El punto B tiene un signo más y un signo menos debido a que es positivo con respecto al punto A, pero negativo con respecto al punto C. En realidad, decir que un punto es positivo o que es negativo, no tiene significado alguno. Un punto tiene que ser positivo o negativo con respecto a algún otro punto.

De la misma manera, no existe una tensión en un punto. La tensión es una *diferencia de potencial* entre dos puntos. Esto se puede apreciar en la ilustración. Si se tiene una caída de 10 volts en cada resistor, la tensión entre los puntos A y B, B y C y C y D son de 10 volts cada una. Pero la tensión entre A y C es la suma de las caídas de tensión entre A y B y B y C, o sea 20 volts. Análogamente, la tensión entre los puntos A y D es 30 volts. Se puede apreciar que al especificar la tensión, deben especificarse *dos puntos.*

circuito del potenciómetro

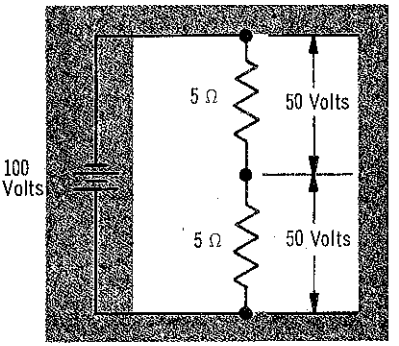
En la ilustración de la página 2-65 puede advertirse que en un circuito con cargas en serie existen diferentes tensiones entre distintos puntos del circuito. Más tarde se comprenderá que esto es muy útil, ya que hace posible obtener diferentes valores de tensión de una fuente. Es obvio que cuanto más cargas en serie se tengan, más valores de tensión existirán en el circuito. Pero para tener muchas tensiones en esta forma, se requiere un número muy grande de cargas en serie.



UN POTENCIOMETRO

tiene el mismo efecto que

DOS RESISTORES EN SERIE



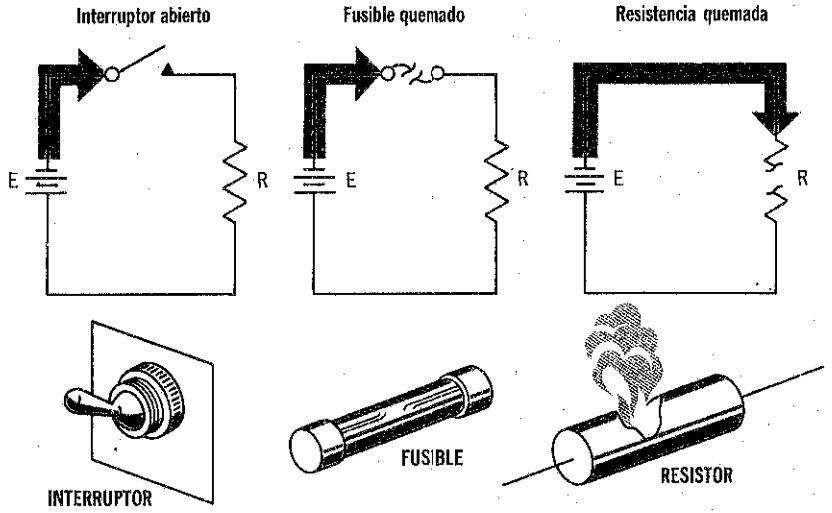
Cambiando el ajuste de un potenciómetro, se puede dividir su resistencia total en dos resistencias en serie de cualquier valor para obtener diferentes caídas de voltaje.

Una forma de obtener muchas tensiones manteniendo el número mínimo de cargas, consiste en usar un potenciómetro como carga. Se recordará que en la página 2-33 se dijo que un potenciómetro tiene tres terminales y las tres están conectadas en un circuito. Por lo tanto, la terminal conectada al brazo móvil del potenciómetro de hecho divide la resistencia total en dos resistencias en serie y cada resistencia tiene su propia caída de tensión. Al variar la resistencia del potenciómetro, puede obtenerse cualquier valor de resistencia así como cualquier valor de tensión.

circuitos abiertos

En un circuito debe haber un recorrido *completo* de la terminal negativa de la fuente de potencia a la terminal positiva, para que la corriente pueda fluir. Un circuito en serie sólo tiene un recorrido y, si se interrumpe, no hay paso de corriente y se convierte en un circuito *abierto*.

En un circuito en serie toda la corriente fluye a través de todos los puntos del circuito. Por lo tanto, si el circuito se abre en cualquier punto, todo el flujo de corriente cesa.

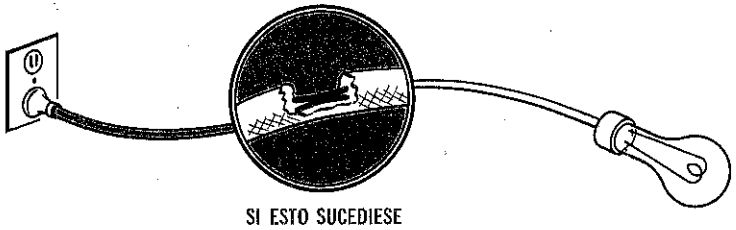


Los circuitos pueden ser abiertos por interruptores y fusibles, así como por partes dañadas o rotas o bien conexiones abiertas.

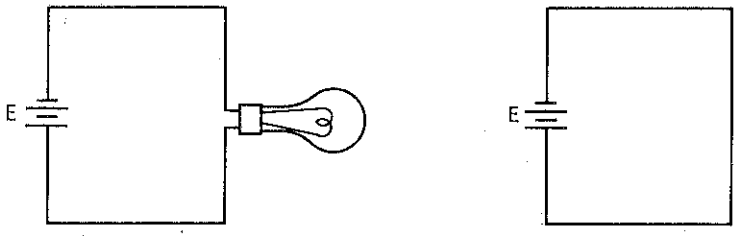
Puesto que toda la corriente deja de fluir cuando se abre un circuito en serie, todo lo que está conectado en un circuito del que depende la corriente, también será afectado.

Se puede abrir un circuito deliberadamente —mediante interruptores, por ejemplo— o se puede abrir como resultado de algún defecto o falla, por ejemplo, un alambre roto o un resistor quemado. Puesto que una corriente demasiado grande en un circuito puede dañar a la fuente de energía y a la carga, por lo general se usan fusibles para proteger al circuito contra daños. La función de un fusible se cumple abriendo el circuito antes de que las corrientes altas puedan ocasionar algún perjuicio.

En tanto *no haya flujo de corriente* en un circuito en serie *abierto*, no hay caída de tensión en las cargas. Las cargas tampoco consumen potencia, de manera que la potencia total consumida en el circuito, es cero.



SI ESTO SUCEDIESE



ESTE CIRCUITO

SE CONVERTIRIA EN ESTE CIRCUITO

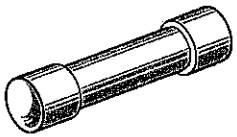
Un circuito corto existe cuando puede fluir corriente de la terminal negativa de la fuente de potencia a través de los conectores, regresando a la terminal positiva de la fuente de potencia sin pasar por carga alguna

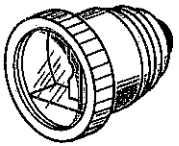
corto circuitos

En un circuito de c-c, la resistencia es lo único que se opone al flujo de corriente. Por lo tanto, si no hubiese resistencia en un circuito, o si la resistencia súbitamente tuviera un valor de cero, se tendría un flujo de corriente muy grande. Esta condición de *no resistencia* y de *muy alta corriente,* recibe el nombre de *corto circuito.*

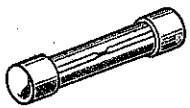
Desde un punto de vista práctico, la resistencia de un circuito no puede reducirse completamente a cero. Aun un tramo de alambre de plata que tuviera área transversal muy amplia, al conectarlo directamente a las terminales de salida de una fuente de tensión, habría alguna resistencia en el circuito. Esta sería la resistencia del alambre y la resistencia interna de la fuente de potencia. Sin embargo, tales resistencias serían tan bajas, que no limitarían mucho flujo de la corriente. Por ejemplo, si la resistencia combinada del alambre y la fuente de energía fuera de 0.5 ohms y la tensión de la fuente fuera de 100 volts, según la ley de Ohm, la corriente sería la siguiente: $I = E/R = 100$ volts/0.5 ohm = 200 amperes.

Por lo tanto, hay un corto circuito, siempre que la resistencia de un circuito sea tan baja que la corriente del circuito aumente al punto en que pueda dañar a las componentes del circuito. La corriente de los corto circuitos puede dañar a las fuentes de energía, quemar el aislante de los alambres e iniciar incendios debido al intenso calor que produce en los conductores. Los fusibles y otros tipos de interruptores constituyen los principales medios de protección contra los peligros de los corto circuitos.





Este es el símbolo de un fusible



Estos son fusibles

Los fusibles abren circuitos antes de que las altas corrientes causadas por cortos circuitos puedan hacer daño alguno. La corriente máxima que puede soportar un fusible antes que se funda y abra el circuito, se llama capacidad del fusible. Los fusibles normalmente están clasificados en amperes; por ejemplo, fusible de 1 amper o fusible de 5 amperes. La clasificación generalmente está marcada en el fusible.

el fusible

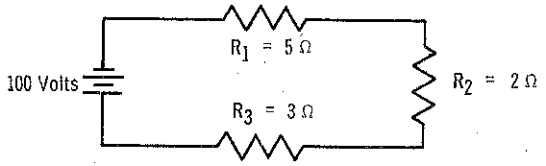
Se sabe que los fusibles abren los circuitos para evitar que las corrientes altas causadas por los corto circuitos causen daño. Por lo tanto, un fusible debe hacer tres cosas: 1) "saber", o sentir, cuando existe un corto circuito; 2) abrir el circuito antes de que haya sufrido daño, y 3) no debe tener efecto en el circuito durante la operación normal; es decir, cuando no existe la condición de corto circuito.

Básicamente, la mayor parte de los fusibles son tramos de conductores o elementos de metal suave, contenidos dentro de algún recipiente. El fusible está conectado a un circuito de manera que el fusible está en serie con las cargas y la fuente de energía. Esto significa que toda la corriente del circuito fluye a través del fusible; éste presenta muy poca resistencia de manera que prácticamente no tiene efecto sobre el circuito, en condiciones normales.

Cuando ocurre un corto circuito, la corriente que pasa a través del fusible aumenta grandemente, lo cual produce un aumento de calentamiento I^2R en dicho fusible; éste tiene un punto de fusión bajo, lo cual significa que se funde a una temperatura más baja que los conductores comunes de alambre. Cuando el calor causado por la corriente del corto circuito llega al punto de fusión del fusible, éste se funde y abre el circuito. La corriente que puede soportar un fusible antes de fundirse depende del material que se use para el elemento y de su área transversal.

Cuando un fusible se funde, queda inutilizado y debe ser substituido. Existe otro tipo de dispositivo de protección que se usa con mucha frecuencia, es el interruptor. Estos dispositivos no se queman, simplemente se disparan, pero pueden reconectarse. En el volumen 1 se describió un interruptor magnético simple.

problemas resueltos



Problema 1. ¿Cuál es la corriente y la potencia total consumida en el circuito?

Puesto que en un circuito en serie, $I = E/R_{TOT}$, debe encontrarse la resistencia total antes de que se pueda calcular la corriente del circuito.

$$R_{TOT} = R_1 + R_2 + R_3 = 5 + 2 + 3 = 10 \text{ ohms}$$

Conociendo la resistencia total, se encuentra la corriente por medio de la ley de Ohm:

$$I = E/R_{TOT} = 100 \text{ volts}/10 \text{ ohms} = 10 \text{ amperes}$$

Hay diferentes maneras de determinar la potencia que consume un circuito. Una de ellas consiste en calcular la potencia empleada por cada resistor y luego sumarlas todas. Otra forma es calcular directamente la potencia usada por la resistencia total del circuito, que vale 10 ohms. Y otra más consiste simplemente en emplear la tensión de la fuente y la corriente del circuito. Cualquiera que sea el método usado, el primer paso es decidir cuáles son las ecuaciones de cálculo de potencia que habrán de usarse. Se recordará que son las siguientes:

$$P = EI \qquad P = I^2R \qquad P = E^2/R$$

Si se decide encontrar la potencia total buscando primero la potencia consumida por cada resistor, deberá usarse la ecuación $P = I^2R$. La razón es que ya se conoce la corriente en cada resistor y el valor del resistor. Por lo tanto,

$$P_{TOT} = I^2R_1 + I^2R_2 + I^2R_3$$
$$= (100 \times 5) + (100 \times 2) + (100 \times 3) = 1{,}000 \text{ watts}$$

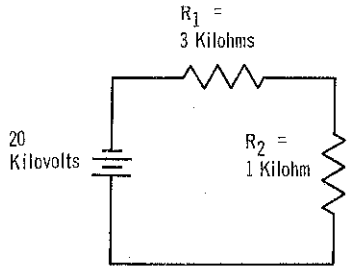
Para encontrar la potencia total mediante la resistencia total del circuito de 10 ohms, también se podría usar la ecuación $P = I^2R$, ya que se conocen la corriente I y la resistencia R_{TOT}.

$$P_{TOT} = I^2R_{TOT} = 100 \times 10 = 1{,}000 \text{ watts}$$

Puesto que se conocen tanto la corriente del circuito como la tensión de la fuente, la potencia consumida en el circuito se puede encontrar también mediante la ecuación $P = EI$.

$$P = EI = 100 \text{ volts} \times 10 \text{ amperes} = 1{,}000 \text{ watts}$$

problemas resueltos (cont.)



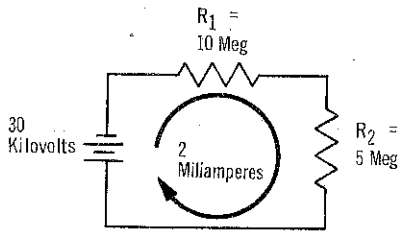
Problema 2. ¿Cuánta corriente hay en este circuito?

Es evidente que los valores de la tensión de la fuente y las resistencias están dadas en múltiplos de unidades básicas. Siempre que esto suceda, debe convertirse a las unidades básicas antes de iniciar la solución del problema.

De acuerdo con lo estudiado en la página 2-54, 1 kilovolt es igual a 1,000 volts. Por lo tanto, la tensión de la fuente del circuito es de 20 por 1,000 ó 20,000 volts. Se recordará también que 1 kilohm es igual a 1,000 ohms. Así pues, el valor del resistor R_1 es 3 por 1,000 ó 3,000 ohms; y el valor del resistor R_2 es 1 por 1,000 ó 1,000 ohms.

En cuanto se han convertido los valores dados a unidades básicas, se usa la ley de Ohm para determinar la corriente:

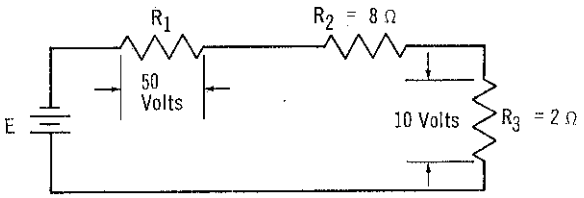
$$I = E/R_{TOT} = E/(R_1 + R_2)$$
$$= 20{,}000 \text{ volts}/ (3{,}000 \text{ ohms} + 1{,}000 \text{ ohms}) = 5 \text{ amperes}$$



Problema 3. Convierta las unidades que se dan en el circuito a las unidades básicas.

Se sabe que 1 kilovolt es igual a 1,000 volts. Por lo tanto, 30 kilovolts es 30 por 1,000 ó 30,000 volts. 1 MΩ es igual a un millón de ohms. Por lo tanto, 10 MΩ es 10 por 1.000,000 ó 10.000,000 de ohms. Y 5 MΩ es 5 por 1.000,000 ó 5.000,000 de ohms. Un miliampere es igual a 1/1,000 ampere. Por lo tanto, 2 miliamperes igual a 2 por 1/1,000 ó 2/1,000, igual a 0.002 ampere.

problemas resueltos (cont.)



Problema 4. ¿Cuál es la tensión de la fuente de este circuito?

Se sabe que, según la ley de Ohm, la ecuación de la tensión es $E = IR$. Por lo tanto, después de examinar el diagrama del circuito, puede verse que una forma para determinar la tensión de la fuente es obtener antes la corriente del circuito y luego el valor de resistencia de R_1. Entonces se puede usar $E = IR_{TOT}$ para calcular la tensión de la fuente. Esto requeriría los siguientes pasos:

1. Mediante la ecuación $I = E_3/R_3$, para determinar la corriente en R_3, que es también la corriente total del circuito, ya que se trata de un circuito en serie.

$$I = E_3/R_3 = 10 \text{ volts}/2 \text{ ohms} = 5 \text{ amperes}$$

2. Usar la ecuación $R_1 = E_1/I$ para determinar la resistencia de R_1.

$$R_1 = E_1/I = 50 \text{ volts}/5 \text{ amperes} = 10 \text{ ohms}$$

3. Usar la ecuación $E = IR_{TOT}$ para calcular la tensión de la fuente.

$$E_{TOT} = IR_{TOT} = I(R_1 + R_2 + R_3) = 5(10 + 8 + 2) = 100 \text{ volts}$$

Otra forma un poco más sencilla de resolver este problema es primero obtener la corriente del circuito y luego calcular la caída de tensión en R_2. Entonces se sabría cuál es la caída de tensión en cada una de las cargas del circuito. Y se recordará que una de las leyes básicas de los circuitos en serie es que la suma de las caídas individuales de tensión es igual a la tensión aplicada de la fuente.

Así pues, para determinar la corriente del circuito se podría aplicar la ecuación $I = E/R$ al resistor R_3.

$$I = E_3/R_3 = 10 \text{ volts}/2 \text{ ohms} = 5 \text{ amperes}$$

Como se trata de un circuito en serie, la misma corriente fluye en el resistor R_2. Por lo tanto, para encontrar la caída de tensión en R_2, se usará la ecuación $E_2 = IR_2$:

$$E_2 = IR_2 = 5 \text{ amperes} \times 8 \text{ ohms} = 40 \text{ volts}$$

Ahora que se conocen las caídas de tensión en R_1, R_2 y R_3, la tensión de la fuente es simplemente la suma de las tres caídas de tensión:

$$E_{FUENTE} = E_{R1} + E_{R2} + E_{R3} = 50 + 40 + 10 = 100 \text{ volts}$$

problemas resueltos (cont.)

Problema 5. ¿Cuánta potencia es consumida en el circuito por el resistor R cuando se abre el interruptor?

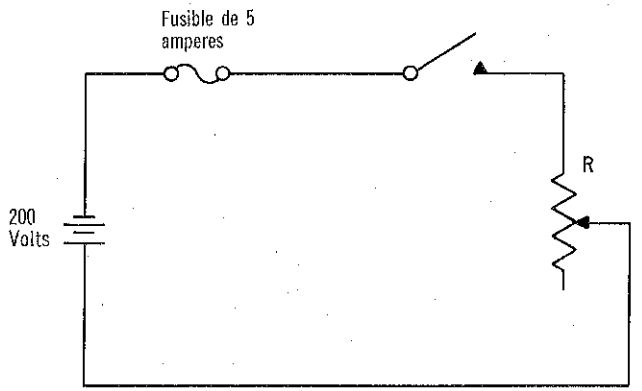
Es obvio que no se utiliza potencia, ya que para emplear potencia, debe haber flujo de corriente; y cuando se abre el interruptor no hay flujo de corriente en ninguna parte del circuito.

Problema 6. Si 5 amperes es la máxima corriente que puede tolerar un fusible antes de fundirse y abrir el circuito, ¿cuál es el valor mínimo que puede tener R?

El valor mínimo de R es el que permite el paso de 5 amperes o:

$$R = E/I = 200 \text{ volts}/5 \text{ amperes} = 40 \text{ ohms}$$

Para cualquier valor menor de la resistencia, la corriente será mayor que 5 amperes y el fusible se "quemará".



Problema 7. Si el fusible se "quema" y abre el circuito, ¿cuál será la caída de tensión en R?

No habrá caída de tensión en R después de "quemarse" el fusible, ya que no habrá corriente en el circuito.

Problema 8. Si R es un resistor de 1,000 watts y si se ajusta para 20 ohms, habrá una corriente de 10 amperes. Esto causará que R disipe 2,000 watts de potencia. ¿Se quemará R?

No. De hecho, la corriente en el circuito no llegará a los 10 amperes, ya que el fusible se quemará a los 5 amperes y abrirá el circuito.

resumen

☐ Un circuito en serie tiene sólo una trayectoria para la corriente. ☐ Si se interrumpe un circuito en serie éste se abre y no hay flujo de corriente. ☐ Las cargas en serie se conectan de tal manera que la corriente total pasa por cada una de ellas. ☐ La resistencia total del circuito para cargas en serie es la suma de las resistencias individuales.

☐ Las fuentes de energía en serie constan de dos o más baterías conectadas entre sí para producir una tensión mayor que la de una sola batería. ☐ La tensión total de fuentes de energía en serie es la suma de las tensiones correspondientes a cada una de las fuentes. ☐ Para fuentes de energía en serie aditiva, las polaridades de las baterías se encuentran en la misma dirección, sumándose las tensiones. ☐ Las polaridades de las baterías en oposición, conectadas en serie, están en direcciones opuestas y las tensiones se restan.

☐ La potencia total consumida en un circuito en serie es la suma de las potencias que consumen las cargas individuales. ☐ La caída total de tensión en todas las cargas de un circuito en serie es igual a la tensión de la fuente. ☐ La polaridad de una caída de tensión en una carga es opuesta a la de la fuente. ☐ La polaridad de la caída de tensión está determinada por la dirección de la corriente. El extremo de una carga por el que entra la corriente es negativo; aquél por donde sale de la carga, es positivo. ☐ La polaridad siempre se da con respecto a un punto de referencia.

preguntas de repaso

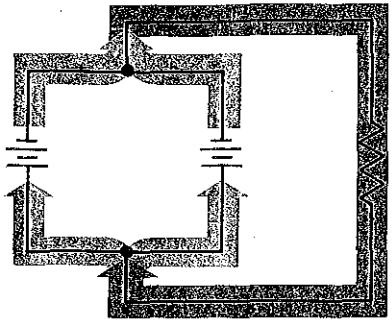
1. Defina *circuito en serie* y *carga en serie.*
2. La potencia total consumida en un circuito en serie es de 100 watts. Si hay dos cargas y una consume 35 watts, ¿cuánto consume la otra?
3. En el circuito de la pregunta 2, ¿cuál es la carga que tiene la corriente más grande?
4. Muestre cómo se pueden obtener tensiones de fuente de 10.5, 7.5, −10.5 y −1.5 volts con dos baterías de 9 volts y 1.5 volts.

Para las preguntas 5 a 10, *considere un circuito que conste de 5 resistores, cuyos valores son: 5, 4, 3, 2 y 1 ohms, en serie con una batería de 30 volts.*

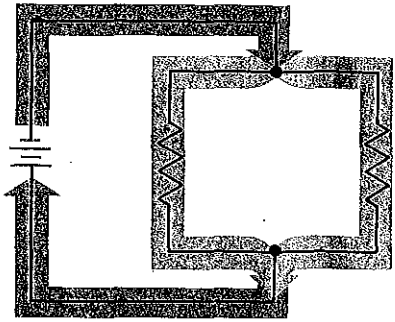
5. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?
6. ¿Cuál es la corriente del circuito?
7. ¿Cuál es la caída de tensión en el resistor de 3 ohms?
8. ¿Cuál es la potencia total consumida en el circuito?
9. ¿Cuál es la potencia consumida por el resistor de 4 ohms?
10. Responder las preguntas 6 a 9 para el circuito abierto.

circuitos en paralelo

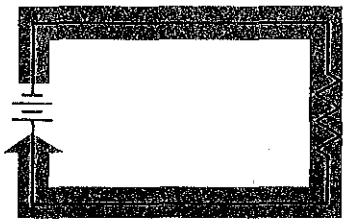
Todos los circuitos que se han estudiado hasta ahora, han sido circuitos en serie. La corriente ha sido la misma en cualquier punto de esos circuitos. Así pues, una vez determinada la corriente en cualquier punto, ésta se conocía en cualquier otro punto del circuito. El análisis de los circuitos de c-c se simplificaría grandemente si todos los circuitos tuvieran esta característica, pero esto no es así.



Este es un circuito en paralelo.



Y este es un circuito en paralelo.

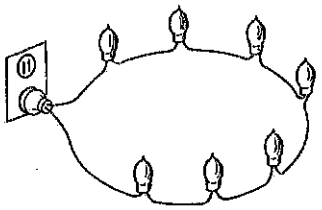


Este NO ES un circuito en paralelo.

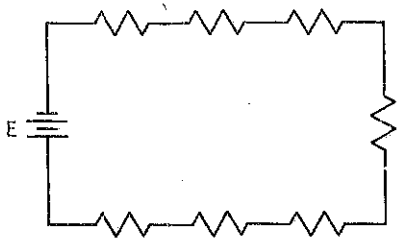
En un circuito en paralelo, la corriente se divide en algún punto y sigue más de una trayectoria. Estas diferentes trayectorias con frecuencia se llaman derivaciones.

Hay un gran número de circuitos en los cuales la corriente no es igual en todos los puntos. En estos circuitos, se puede tener un número cualquiera de *corrientes diferentes.* Todas las corrientes tienen la misma polaridad, ya que son circuitos de c-c; pero sus magnitudes pueden variar grandemente. A estos circuitos se les llama *circuitos en paralelo* y se pueden definir como sigue: *Un circuito en paralelo es aquél en el que existen uno o más puntos donde la corriente se divide y sigue trayectorias diferentes.*

Cuando se conectan las componentes de los circuitos de tal manera que se tengan trayectorias diferentes de corriente, se dice que las com-

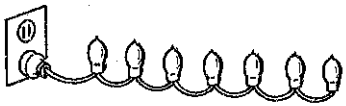


Lámparas en serie

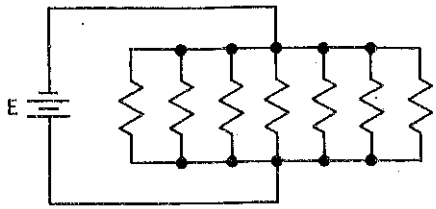


Circuito

Si una se quema, todas se apagan



Lámparas en paralelo



Circuito

Si una se quema, el resto permanece encendido

Si el lector tiene focos para árbol de Navidad, está familiarizado con una de las características básicas de las cargas en paralelo. Esto es, a diferencia de las cargas en serie, si una carga o derivación se abre, la corriente sigue pasando por todas las otras cargas

cargas en paralelo

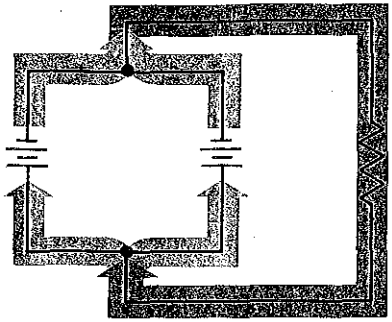
En un circuito en serie, toda carga tiene igual corriente a través de ella; y ésta es la misma corriente que simultáneamente sale de la fuente de potencia y entra a ella. Muy a menudo, sin embargo, las cargas están conectadas en un circuito de manera que la *corriente* de la fuente de energía se *divide* entre las cargas, en tal forma que sólo una *parte* de la corriente pasa por cada carga. Entonces se dice que las cargas están conectadas en paralelo y que es un circuito en paralelo.

En el circuito en paralelo, cada carga constituye un recorrido aparte para el flujo de la corriente. Los recorridos aparte se llaman ramas y la corriente que pasa en cada rama recibe el nombre de *corriente de rama.* Puesto que la corriente que sale de la fuente de energía se divide entre las ramas, es obvio que la corriente en cualquier rama es inferior a la corriente de la fuente.

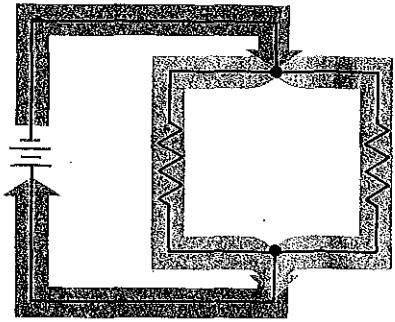
Si una rama de un circuito paralelo es interrumpida o abierta, seguirá fluyendo corriente en el circuito, ya que siguen existiendo una o más trayectorias completas para el flujo de la corriente a lo largo de

circuitos en paralelo

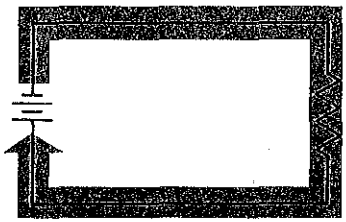
Todos los circuitos que se han estudiado hasta ahora, han sido circuitos en serie. La corriente ha sido la misma en cualquier punto de esos circuitos. Así pues, una vez determinada la corriente en cualquier punto, ésta se conocía en cualquier otro punto del circuito. El análisis de los circuitos de c-c se simplificaría grandemente si todos los circuitos tuvieran esta característica, pero esto no es así.



Este es un circuito en paralelo.



Y este es un circuito en paralelo.

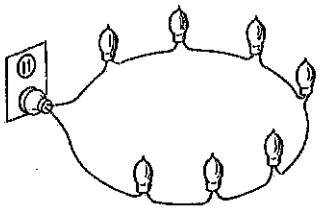


Este NO ES un circuito en paralelo.

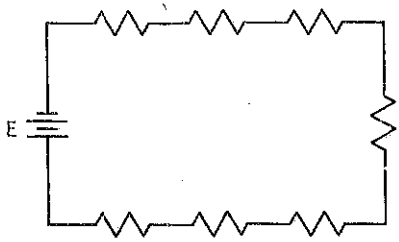
En un circuito en paralelo, la corriente se divide en algún punto y sigue más de una trayectoria. Estas diferentes trayectorias con frecuencia se llaman derivaciones.

Hay un gran número de circuitos en los cuales la corriente no es igual en todos los puntos. En estos circuitos, se puede tener un número cualquiera de *corrientes diferentes.* Todas las corrientes tienen la misma polaridad, ya que son circuitos de c-c; pero sus magnitudes pueden variar grandemente. A estos circuitos se les llama *circuitos en paralelo* y se pueden definir como sigue: *Un circuito en paralelo es aquél en el que existen uno o más puntos donde la corriente se divide y sigue trayectorias diferentes.*

Cuando se conectan las componentes de los circuitos de tal manera que se tengan trayectorias diferentes de corriente, se dice que las com-

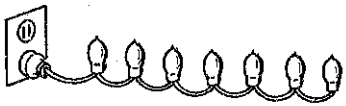


Lámparas en serie

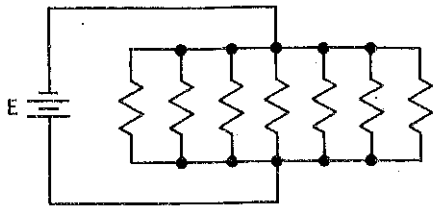


Circuito

Si una se quema, todas se apagan



Lámparas en paralelo



Circuito

Si una se quema, el resto permanece encendido

Si el lector tiene focos para árbol de Navidad, está familiarizado con una de las características básicas de las cargas en paralelo. Esto es, a diferencia de las cargas en serie, si una carga o derivación se abre, la corriente sigue pasando por todas las otras cargas

cargas en paralelo

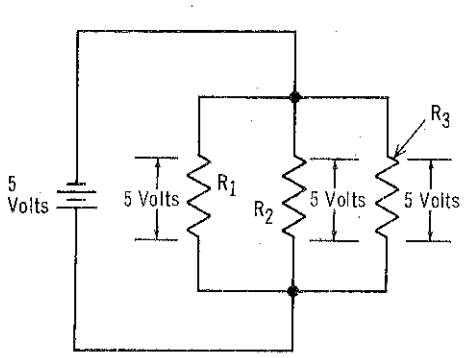
En un circuito en serie, toda carga tiene igual corriente a través de ella; y ésta es la misma corriente que simultáneamente sale de la fuente de potencia y entra a ella. Muy a menudo, sin embargo, las cargas están conectadas en un circuito de manera que la *corriente* de la fuente de energía se *divide* entre las cargas, en tal forma que sólo una *parte* de la corriente pasa por cada carga. Entonces se dice que las cargas están conectadas en paralelo y que es un circuito en paralelo.

En el circuito en paralelo, cada carga constituye un recorrido aparte para el flujo de la corriente. Los recorridos aparte se llaman ramas y la corriente que pasa en cada rama recibe el nombre de *corriente de rama.* Puesto que la corriente que sale de la fuente de energía se divide entre las ramas, es obvio que la corriente en cualquier rama es inferior a la corriente de la fuente.

Si una rama de un circuito paralelo es interrumpida o abierta, seguirá fluyendo corriente en el circuito, ya que siguen existiendo una o más trayectorias completas para el flujo de la corriente a lo largo de

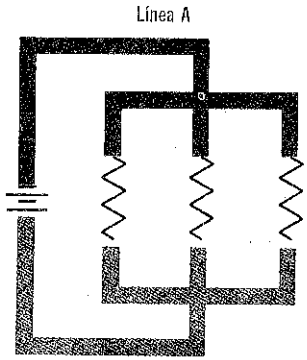
caída de tensión en cargas en paralelo

De lo que se estudió de circuitos en serie, se recordará que una parte de la tensión de la fuente constituye la caída de cada carga en serie. Y la suma de cada una de estas caídas de tensión es igual a la tensión de la fuente. Cuando se conectan cargas en paralelo, también se tienen caídas de tensión en cada carga. En lugar de que se tenga una caída de la tensión de la fuente en cada carga, como en un circuito en serie; sin embargo, se tiene la caída de *tensión total de la fuente* en ella. La razón es que todas las cargas conectadas en paralelo están también conectadas directamente a las terminales de la fuente de energía.



$E_{FUENTE} = E_{R1} = E_{R2} = E_{R3}$

(A)



(B)

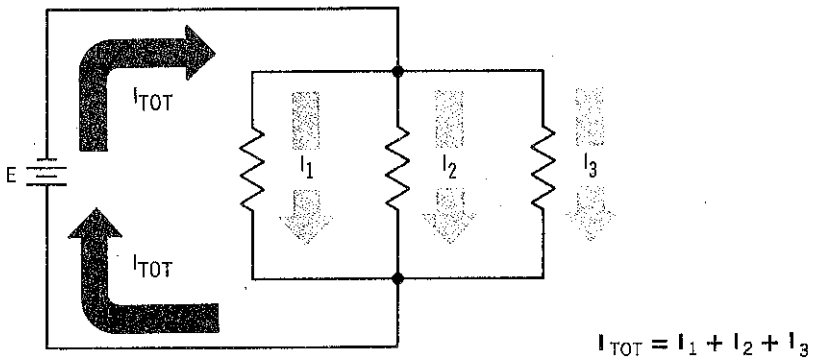
Si se examina el diagrama del circuito (A), se puede apreciar que la tensión de la fuente es la misma en cada rama, si se consideran las líneas que representan los conductores de conexión como líneas de igual potencial. En otras palabras, las líneas que conectan la carga con la fuente de energía tienen el mismo potencial en toda su extensión. Esto se ilustra en el diagrama (B).

La línea A es el potencial de la terminal negativa de la batería en toda su longitud. La línea B tiene el potencial de la terminal positiva de la batería en toda su longitud. La diferencia de potencial entre las terminales de la batería es de 5 volts, de manera que la diferencia de potencial en cada carga también debe ser de 5 volts.

efecto de las cargas en paralelo sobre la corriente

En un circuito en paralelo, la corriente que sale de la fuente de energía se divide en algún punto, y pasa a través de las ramas recombinándose luego y regresando a la fuente de energía. Existen, pues *dos* tipos de corriente en un circuito paralelo: la corriente que sale de la fuente de energía y regresa a ella y que es al mismo tiempo la *corriente total* y las *corrientes de rama.* Puesto que la corriente total se divide para formar las corrientes de rama, la *suma* de las corrientes de rama debe ser igual a la corriente total.

$$I_{TOT} = I_1 + I_2 + I_3$$

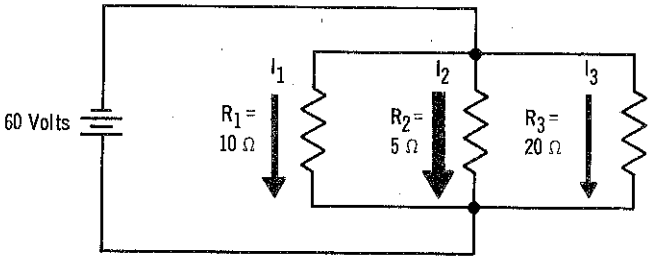


La corriente total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las corrientes de las ramas.

Las corrientes de rama se determinan de acuerdo con la resistencia de la rama y la tensión aplicada a ella. Puesto que todas las ramas tienen la misma tensión en sus extremos, cuanto mayor sea la resistencia en una rama, menor corriente tendrá. Igualmente, cuanto menor sea la resistencia, mayor será la corriente. La corriente total en un circuito paralelo depende de la tensión de la fuente y la resistencia total del circuito. Como se verá luego, al agregar cargas en paralelo a un circuito se disminuye la resistencia total del circuito, aumentando por ello la corriente total.

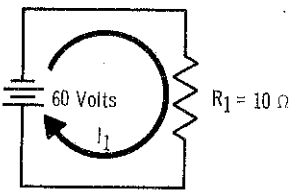
cálculo de las corrientes de rama

Cada rama en un circuito paralelo lleva una corriente separada. Sin embargo, dentro de cada rama la corriente es la misma en todos sus puntos. Por lo tanto, la tensión que hay en los extremos de cada rama es igual a la tensión de la fuente; asimismo, la resistencia y la corriente es igual en todos los puntos. Esta condición es semejante a un circuito en serie. En efecto, ésta es la forma en que se calculan las corrientes en las ramas de circuitos en paralelo. Se considera *una* rama a la vez, considerándola como circuito en serie y se aplican las ecuaciones de la ley de Ohm.

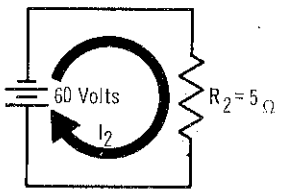


Para calcular las corrientes de las derivaciones en un circuito en paralelo, considérese cada derivación como un circuito en serie separada, aplicándose entonces la ley de Ohm. Así pues, el circuito de la figura deberá manejarse como tres circuitos separados.

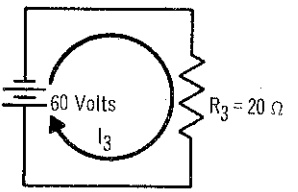
ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
FERNANDO POO
"ACERVO"



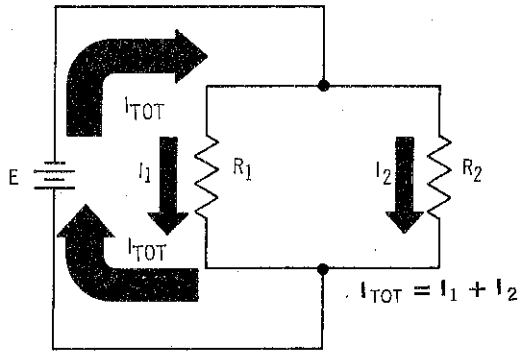
$I_1 = E/R_1$



$I_2 = E/R_2$



$I_3 = E/R_3$



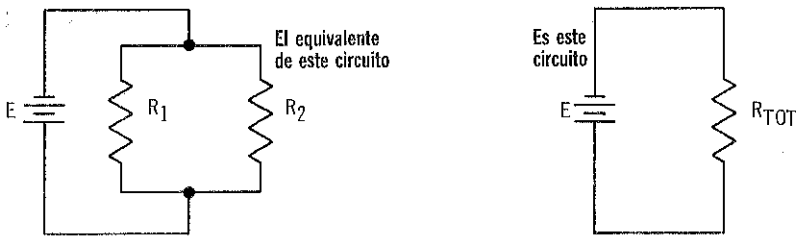
La corriente total en un circuito en paralelo se puede encontrar calculando todas las corrientes parciales y sumándolas.

cálculo de la corriente total

Puesto que la corriente total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las corrientes parciales, una forma de determinar la corriente total es calcular todas las corrientes parciales y sumar luego sus valores. Por ejemplo, en la ilustración de la página 2-79, la corriente total del circuito es igual a la suma de las corrientes en las tres ramas, o sea 6 amperes más 12 amperes más 3 amperes, lo que da un total de 21 amperes. Con frecuencia, para determinar la corriente total de un circuito en paralelo, es más fácil calcular la resistencia total en el circuito y usar luego la ecuación de la ley de Ohm:

$$I_{TOT} = E/R_{TOT}$$

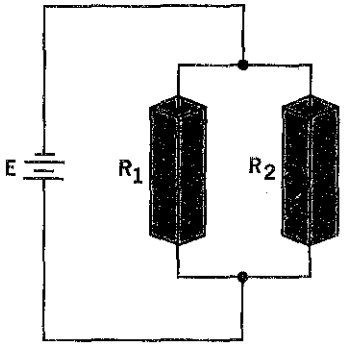
Con lo que ya se sabe acerca de circuitos en serie, podría pensarse que éste es el método que se puede aplicar más fácilmente. Sin embargo, esto no sucede así porque, a veces, calcular la resistencia total de un circuito en paralelo es tan laborioso, o más, que calcular la de todas las corrientes de rama.



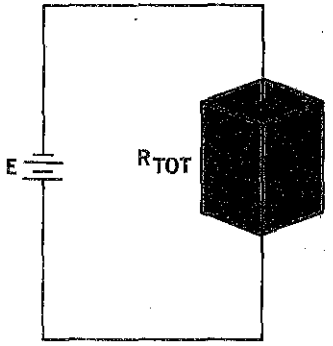
...O puede encontrarse la corriente total calculando la resistencia total del circuito y encontrando luego la corriente total, tal como se haría para circuitos en serie.

cómo calcular la resistencia total

En un circuito en serie, la resistencia total es simplemente la suma de todas las resistencias particulares. Cuantas más resistencias se tengan, mayor será la resistencia total. Por lo tanto, es obvio que la resistencia total es mayor que cualquiera de las resistencias particulares.



¿Cuál es el valor total de las resistencias en paralelo más pequeño que el de las resistencias por separado? Esto se aclarará si se recuerda que la resistencia de un material puede reducirse aumentando su área transversal.



Y esto es efectivamente lo que se hace cuando se conectan resistencias en paralelo. Cada trayectoria de resistencia permite el flujo de mayor cantidad de corriente

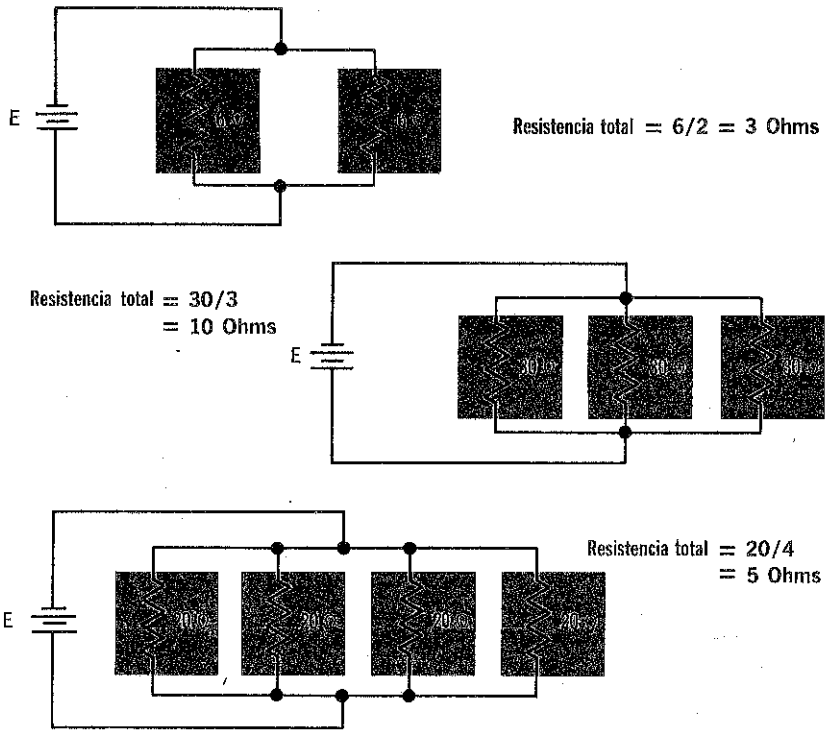
En un circuito en paralelo, la relación entre la resistencia total y las resistencias particulares es completamente diferente y, de hecho, casi opuesta. Para circuitos en paralelo, la resistencia total *no* es la suma de las resistencias particulares. Cuantas *más* resistencias se tengan, *menor* será la resistencia total y la resistencia *total* es *menor* que cualquiera de las resistencias particulares. La razón es que cada resistor en una nueva rama toma más corriente de la fuente para aumentar la corriente total. Y un aumento en la corriente total sólo puede ocurrir a causa de una disminución en la resistencia total. Por lo tanto, el cálculo de la resistencia total para un circuito en paralelo es bastante diferente que la de un circuito en serie.

Existen varias maneras para determinar la resistencia total de resistencias en paralelo. El mejor método en cualquier caso particular depende generalmente de cuántas resistencias se tengan y de si sus valores son iguales o no.

resistencias iguales en paralelo

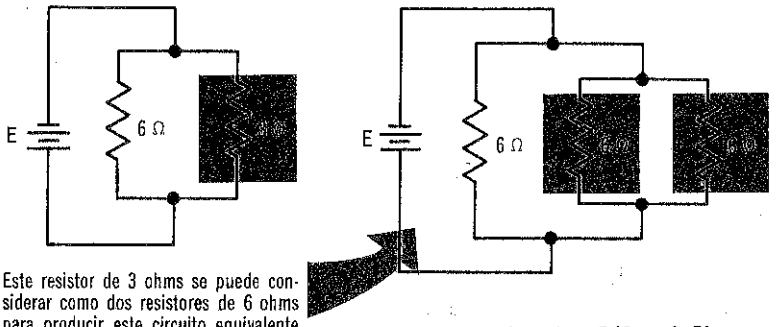
La disposición más simple de resistencias en paralelo es cuando dos de ellas están en paralelo y sus valores son *iguales.* Si se consideran las dos resistencias como piezas del mismo material y de las mismas dimensiones, se sabe que las dos juntas tendrán el doble del área transversal de una sola de ellas. Por lo tanto, podrían substituirse en el circuito con una sola pieza del mismo material y la misma longitud pero con el doble del área transversal.

Si se revisa la página 2-14, se recordará que si se duplica el área transversal de una pieza de material y no se cambia su longitud, la resistencia se reduce a la mitad. Por lo tanto, la resistencia total de *dos* resistencias iguales en paralelo es igual a *la mitad* del valor de una sola de las resistencias. De la misma manera, la resistencia total de *tres* resistencias iguales en paralelo es igual a *la tercera parte* del valor de cualquiera de las resistencias. En consecuencia, se puede formular una regla general para resistencias iguales en paralelo: *La resistencia total de un número determinado de resistencias en paralelo, si todas tienen el mismo valor, es igual al valor de una de las resistencias dividida entre el número de las mismas.*



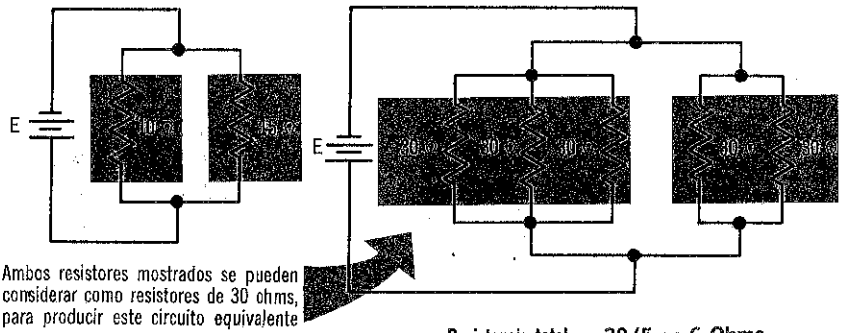
resistencias iguales en paralelo (cont.)

Generalmente, si las resistencias en paralelo no son iguales, esta regla de resistencia igual no se puede aplicar. Sin embargo, si los diferentes valores de resistencia son *múltiplos* uno de otro, se puede usar una variación de la regla de resistencias iguales debido a que toda resistencia se puede considerar como si fueran dos o más resistores en paralelo. Por ejemplo, un resistor de 4 ohms se puede considerar como dos resistores de 8 ohms en paralelo; o tres de 12 ohms en paralelo, o diez de 40 ohms en paralelo. Por lo tanto, cuando los resistores en paralelo tienen valores que son múltiplos unos de otros, los resistores de menor valor se consideran como combinaciones con las que se obtiene un circuito equivalente que tiene igual resistencia, y por lo tanto, se puede aplicar la regla de resistencias iguales. Este método también se usa cuando los valores de los resistores no son múltiplos uno de otro, pero puede separarse a los resistores en otros que tengan un valor múltiple común. Por ejemplo, resistores de 10 y 15 ohms pueden cambiarse ambos, a equivalentes de 30 ohms.



Este resistor de 3 ohms se puede considerar como dos resistores de 6 ohms para producir este circuito equivalente

Resistencia total = 6/3 = 2 Ohms



Ambos resistores mostrados se pueden considerar como resistores de 30 ohms, para producir este circuito equivalente

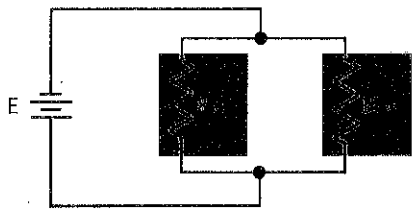
Resistencia total = 30/5 = 6 Ohms

dos resistencias desiguales en paralelo

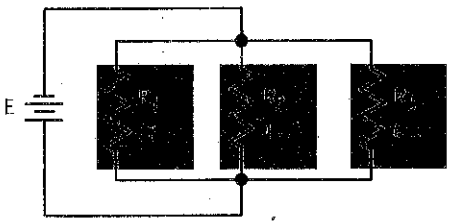
Cuando se tienen dos resistencias en paralelo, pero sus valores no son iguales ni se pueden convertir a múltiplo común, la resistencia total no se puede determinar mediante la regla de resistencias iguales. En cambio, debe aplicarse lo que se llama método de *producto/suma*, o producto sobre la suma. Para aplicar este método, primero se multiplican los valores de las dos resistencias para obtener su *producto*. Luego se suman los valores de las dos resistencias para obtener su *suma*. Finalmente, se divide el producto entre la suma y el resultado es la resistencia total. Por ejemplo, si se usa un conjunto de valores de resistores como el usado en la página 2-83, se podrá mostrar cómo este método produce los mismos resultados. Si los valores de dos resistencias en paralelo fuesen de 6 ohms y 3 ohms, primero se multiplican sus valores ($6 \times 3 = 18$) para obtener un producto de 18. Luego se agregan sus valores ($6 + 3 = 9$) para obtener una suma de 9. Finalmente, se divide el producto entre la suma ($18/9 = 2$) para obtener la resistencia total de 2 ohms. En forma de ecuación, este método se puede expresar de la manera siguiente:

$$R_{TOT} = \frac{\text{producto}}{\text{suma}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

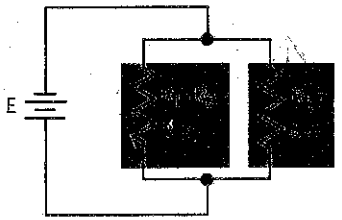
El método del producto/suma se puede seguir también para dos resistencias en paralelo cuyos valores sean los mismos o tengan el mismo múltiplo. Pero con frecuencia esto representaría una labor innecesaria.



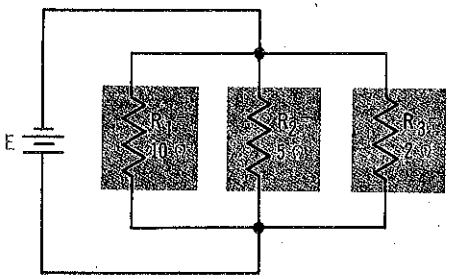
Resistencia total =
(8 x 15)/(8 + 15) =
$120/23 = 5\frac{5}{23}$ Ohms



Resistencia total de $R_1 + R_2$ =
(12 x 4)/(12 + 4) = 3 Ohms

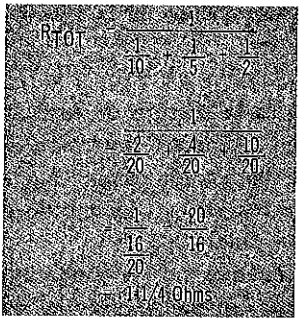


Resistencia total =
(3 x 6)/(3 + 6) = 18/9 = 2 Ohms



$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Se puede usar el método recíproco para calcular la resistencia total de cualquier combinación de resistencias en paralelo. En este circuito,



tres o más resistencias desiguales en paralelo

El método producto/suma que se acaba de aprender es un caso especial de un método mucho más general para calcular la resistencia total de un circuito paralelo; el método general se puede seguir para *cualquier número* de resistencias y funciona independientemente de que las resistencias sean *iguales* o *desiguales*. De hecho, este método se deriva de las ecuaciones que representan la ley de Ohm.

Este método general recibe el nombre de *método recíproco*. El recíproco de un número es la unidad dividida por ese número. Así pues, el recíproco de 2 es ½, ó 0.5; el recíproco de 4 es ¼ ó 0.25; y el recíproco de 10 es 1/10 ó 0.1.

Según el método recíproco, se calcula primeramente la recíproca del valor de cada resistencia. Luego se suman estos valores para tener el recíproco total. Y finalmente, se determina el recíproco del recíproco total. Este método se expresa mediante la ecuación:

$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \text{etc.}}$$

1312-1711

cómo calcular la resistencia total a partir de la corriente y la tensión

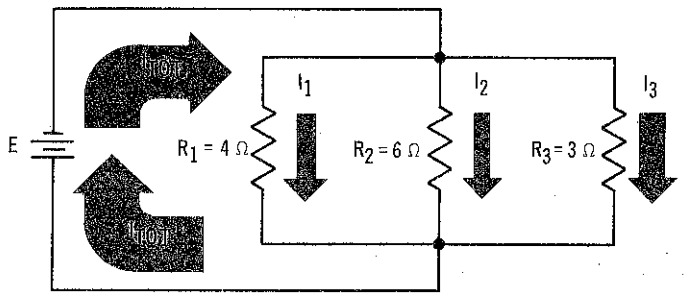
Los diversos métodos que se conocen para calcular la resistencia efectiva de circuitos en paralelo, tratan solamente de valores de resistencia. Sin embargo, se puede aplicar también la ley de Ohm para determinar la resistencia efectiva de circuitos en paralelo. Si se conocen la corriente total del circuito y la tensión, puede obtenerse fácilmente la resistencia total por medio de la ley de Ohm en su forma siguiente:

$$R_{TOT} = E/I_{TOT}$$

donde E es la tensión de la fuente e I_{TOT} es la corriente total.

Si sólo se conoce la tensión de la fuente, se puede obtener la corriente total calculando en primer lugar la corriente de cada una de las ramas y luego sumándolas. La ley de Ohm se usa entonces para determinar la resistencia total.

Aun cuando no se conozcan la tensión de la fuente ni la corriente del circuito, se puede usar la ley de Ohm para determinar la resistencia efectiva de un circuito paralelo. Suponiendo cualquier tensión de fuente que se desee, se calculan potencias hipotéticas en las ramas con esta tensión. Sumando estas corrientes en las ramas, se obtiene la corriente hipotética total. A partir de la tensión supuesta y la corriente total que se ha determinado, se usa la ecuación $R_{TOT} = E/I_{SUPUESTA}$ para determinar la resistencia total.



Para este circuito se supondrá que la tensión de la fuente es de 12 volts. Por lo tanto, también se supone que la tensión de cada rama es de 12 volts. Por consiguiente:

$$I_{TOT} = E/R_1 + E/R_2 + E/R_3 = 3 + 2 + 4 = 9 \text{ amperes}$$

Entonces se puede obtener la resistencia total según la siguiente fórmula:

$$R_{TOT} = E_{SUPUESTA}/I_{TOT} = 12 \text{ volts}/9 \text{ amperes} = 1.33 \text{ amperes}$$

Debe obtenerse el mismo resultado mediante el método recíproco.

resumen

☐ Un circuito paralelo es aquel en que existen uno o más puntos en donde la corriente se divide para seguir trayectorias diferentes. ☐ Las cargas en paralelo están conectadas de tal manera que la corriente total se divide entre las cargas. ☐ Toda la tensión de la fuente se vuelve caída en cada carga en paralelo. ☐ Las trayectorias diferentes en un circuito en paralelo se llaman ramas. ☐ La corriente que pasa en cada rama se llama corriente de rama. ☐ La corriente total de un circuito en paralelo es igual a la suma de las corrientes de rama. ☐ La adición de cargas en paralelo al circuito hace disminuir la resistencia total del circuito, aumentando, por consecuencia, la corriente total.

☐ La resistencia total de cualquier número de resistencias en paralelo, todas con el mismo valor, es igual al valor de una resistencia dividido entre el número de resistencias. La resistencia total de dos resistencias en paralelo se puede determinar mediante el método producto/suma: $R_{TOT} = (R_1 \times R_2)/(R_1 \times R_2)$.

☐ Se puede seguir el método recíproco para determinar la resistencia total de cualquier número de resistencias, iguales o desiguales:

$$R_{TOT} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \cdots +}.$$

☐ Cuando no se conocen la tensión de la fuente ni la corriente total, se puede determinar la resistencia total suponiendo una tensión conveniente en la fuente, obteniendo la corriente supuesta total y luego determinando la resistencia total según la siguiente ecuación: $R_{TOT} = E_{SUPUESTA} \div I_{TOT}$.

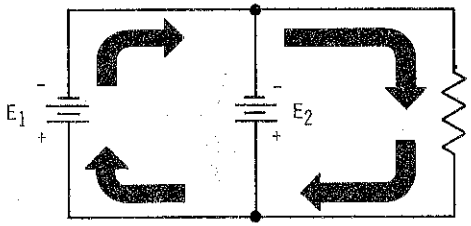
preguntas de repaso

1. ¿Qué es un circuito en paralelo?
2. Determine R_{TOT} para seis resistores de 10 ohms en paralelo.
3. Determine R_{TOT} para seis resistores de 10 ohms en serie.
4. ¿Qué efecto tiene en las corrientes de rama el duplicar la tensión de la fuente? Lo anterior, ¿qué efecto tiene en la resistencia total del circuito?
5. ¿Cuál es la ecuación del *método recíproco* para obtener R_{TOT}?
6. ¿Cuál es la ecuación *producto/suma* para la resistencia total?
7. ¿Cuál ecuación debe aplicarse para obtener la resistencia equivalente a dos resistores iguales en paralelo? ¿Cuál para los dos resistores desiguales?
8. ¿Cuándo se puede seguir el método recíproco para determinar R_{TOT}?
9. Un circuito en paralelo de cuatro ramas tiene corrientes ramales de 2, 3, 5 y 10 amperes. ¿Cuál es la corriente total?
10. Si la resistencia de la rama de 2 amperes en la pregunta 9 es de 10 ohms, ¿cuáles son los valores de las otras resistencias y la resistencia total?

fuentes de energía en paralelo

Téngase presente que un circuito en paralelo tiene más de una trayectoria para el flujo de corriente. Hasta ahora, los únicos tipos de circuitos en paralelo que se han estudiado son los que tienen cargas en paralelo. En estos circuitos, la corriente que sale de la fuente de potencia es la corriente total del circuito, la cual se divide entre las ramas del circuito.

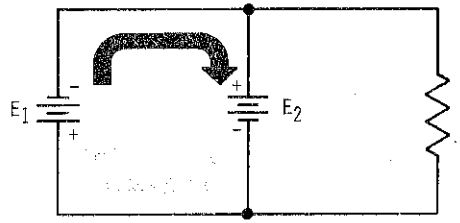
Otro tipo de circuito en paralelo es el que tiene fuentes de energía en paralelo. En este tipo de circuito, cada fuente de energía suministra *parte* de la corriente que fluye en la carga. Por lo tanto, la corriente en la carga es la *corriente total del circuito* y la corriente en cada fuente de energía es *corriente de rama.*



Toda la corriente de cada fuente de potencia fluye a través de la carga

Forma incorrecta de conectar fuentes de potencia en paralelo

Las fuentes de potencia forman un circuito completo por sí mismas y no hay corriente por la carga



Forma correcta de conectar fuentes de potencia en paralelo

Cada fuente de potencia conectada en paralelo alimenta parte de la corriente total del circuito. Esta corriente puede ser suministrada sólo a una carga o se puede dividir entre cargas en paralelo

Los circuitos que tienen fuentes de energía en paralelo también pueden tener cargas en paralelo. En estos circuitos, la corriente total es la *suma* de las corrientes en las distintas ramas.

Sólo las fuentes de energía que tengan la *misma tensión de salida,* deben conectarse en paralelo. Si se conectan en paralelo fuentes con tensiones diferentes, habrá alguna corriente que fluya de la fuente de tensión más alta a la de tensión más baja. Esta corriente sería *desperdiciada,* ya que no iría a la carga.

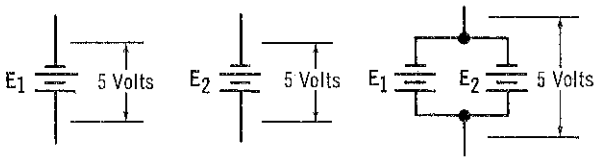
efecto de fuentes de energía en paralelo sobre la corriente

Cuando dos fuentes de energía con la misma tensión de salida se conectan en paralelo, la tensión de salida de la combinación en paralelo es la *misma* que la de *cada una* de las fuentes. No hay aumento ni disminución en la tensión. Por lo tanto, la corriente en las cargas, independientemente de que sea una o más de ellas, es la misma que si sólo se usara una fuente de energía. Entonces, ¿por qué usar fuentes de energía en paralelo? Una respuesta es que las fuentes de energía no suelen suministrar la corriente *total* necesaria en el circuito, pero si se conectan dos fuentes en paralelo, cada una suministrará solamente una *parte* de la corriente del circuito. Por ejemplo, considere una carga de 2 ohms que necesita una corriente de 10 amperes para operar correctamente. Según la ley de Ohm, la tensión que se necesita es la siguiente:

$$E = IR = 10 \text{ amperes} \times 5 \text{ ohms} = 50 \text{ volts}$$

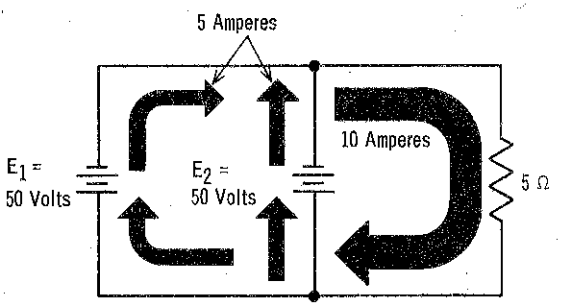
Pero suponga que las únicas fuentes de energía de 50 volts de que se dispone, sólo pueden dar 8 amperes. En este caso, habrán de conectarse dos fuentes de potencia de 50 volts, en paralelo.

Con frecuencia las baterías se conectan en paralelo para *alargar* su *vida*. Cuando se toma corriente de una batería, ésta se descarga. Cuanta más corriente se tome, más rápidamente se descarga la batería. Cuando se conectan baterías en paralelo, cada una suministra solamente una porción de la corriente del circuito. En consecuencia, se descargan más lentamente y duran más. Las fuentes de energía y sus limitaciones de corriente se estudian en el volumen 6.



Las fuentes en paralelo se usan:

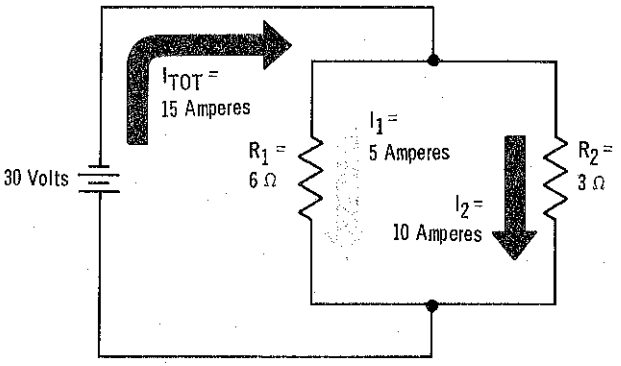
1) Cuando una fuente no puede suministrar toda la corriente requerida
2) Para aumentar la vida de las baterías



Cada fuente en paralelo alimenta parte de la corriente a la carga. Si existen dos fuentes, cada una suministra la mitad de la corriente; si tres, la tercera parte de la corriente; etc.

consumo de potencia

Ya se ha visto que en un circuito en serie, la potencia total consumida es igual a la suma de las potencias que utilizan las cargas. También se sabe que la potencia total se puede calcular directamente a partir de los valores de la corriente total del circuito, la resistencia total del circuito y la tensión de la fuente, si se conocen cualesquiera de estos dos valores. Las *mismas* relaciones son aplicables a la potencia en un circuito paralelo. La potencia total se puede calcular *directamente* a partir de la corriente total, de la resistencia total y de la tensión de la fuente; o se puede determinar *indirectamente*, haciendo la suma de los consumos de potencia de cada carga.



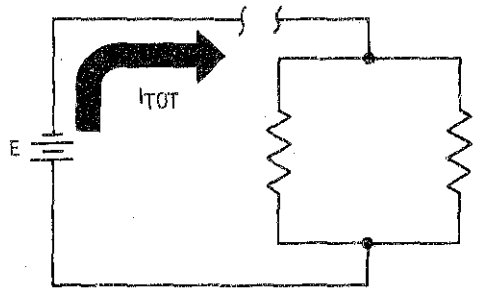
$$R_{TOT} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = \frac{18}{9} = 2 \text{ Ohms}$$

La potencia total consumida en el circuito en paralelo se puede calcular directamente por medio de cualquiera de las tres ecuaciones siguientes:

$$P = EI_{TOT} = 30 \text{ volts} \times 15 \text{ amperes} = 450 \text{ watts}$$
$$P = I^2_{TOT} R_{TOT} = (15 \text{ amperes})^2 \times 2 \text{ ohms} = 450 \text{ watts}$$
$$P = E^2/R_{TOT} = (30 \text{ volts})^2/2 \text{ ohms} = 450 \text{ watts}$$

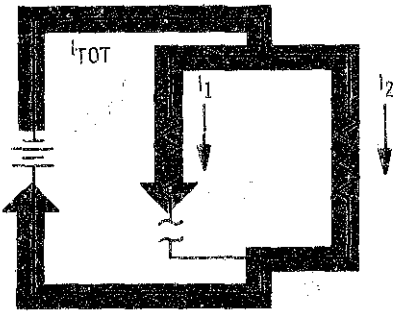
La potencia total también se puede obtener calculando la potencia usada en cada rama y luego sumándolas:

$$P_{R1} = I_1^2 R_1 = (5 \text{ amperes})^2 \times 6 \text{ ohms} = 150 \text{ watts}$$
$$P_{R2} = I_2^2 R_2 = (10 \text{ amperes})^2 \times 3 \text{ ohms} = 300 \text{ watts}$$
$$P_{TOT} = P_{R1} + P_{R2} = 150 + 300 = 450 \text{ watts}$$



Interrupción de un circuito paralelo, en donde la corriente total abre todo el circuito, cesando el flujo de corriente. Sin corriente, no hay energía consumida en el circuito ni caída de tensión en las cargas

Interrupción de un circuito paralelo en donde el flujo de corriente del ramal abre sólo ese ramal. La corriente total y la corriente en los otros siguen fluyendo. Los valores de las corrientes totales, sin embargo, cambiarán. La razón es que cuando se abre una rama, su resistencia ya no es parte del circuito y la resistencia total aumenta



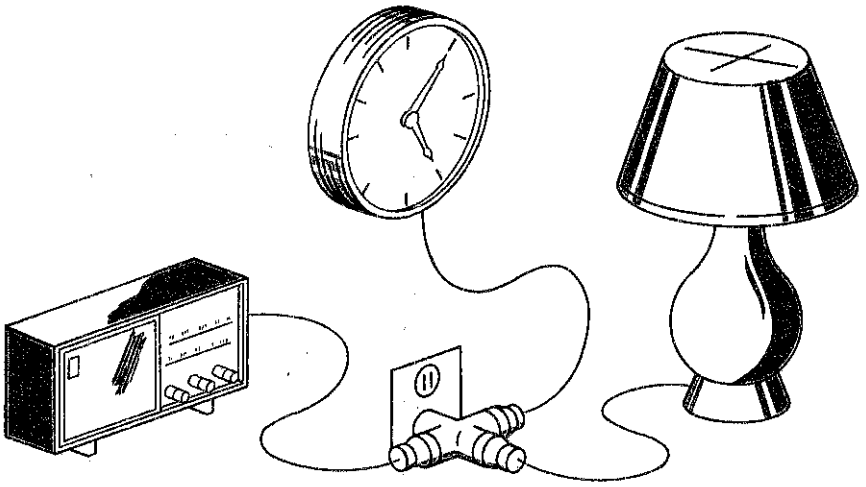
circuitos abiertos

Si un circuito en serie se rompe en cualquier punto, no hay paso de corriente. Esto se debe a que sólo hay una trayectoria de corriente en un circuito en serie y si esta trayectoria no está completa, el circuito estará abierto. Sin embargo, un circuito en paralelo tiene más de una trayectoria para la corriente. Por lo tanto, aun cuando una de las trayectorias esté abierta, fluirá corriente en el circuito en tanto una o más de las otras trayectorias constituya un circuito *completo* desde la terminal negativa de la fuente de energía hasta la terminal positiva. Sin embargo, esto no significa que no se pueda hacer ese flujo de corriente en un circuito paralelo abriéndolo en un punto. Lo que en realidad significa es que el comportamiento de un circuito en paralelo abierto en algún punto depende de dónde esté la apertura o ruptura.

Si el circuito se abre en un punto a través del cual fluye la corriente *total* del circuito, todo queda abierto y toda corriente cesa. Sin embargo, si se abre en un punto en que sólo fluye una corriente de *rama*, entonces sólo esta rama se abre y la corriente continúa circulando en el resto del circuito. Se puede concluir de esto que para que un fusible desarrolle su función en un circuito en paralelo, debe estar conectado en un lugar por donde fluya toda la corriente del circuito o, en su defecto, cada rama debe tener su propio fusible.

cortos circuitos

Cuando un circuito en paralelo se conecta en corto, se presentan los mismos fenómenos que cuando un circuito en serie queda en corto. Se recordará que estos efectos incluyen un aumento súbito y muy grande en la corriente del circuito, calentamiento en los alambres de conexión y, tal vez, que se queme el aislamiento o la fuente de potencia.



Si cualquier carga en un circuito en paralelo se conecta en corto, la resistencia del circuito desciende prácticamente a cero. La razón es que cada carga está conectada a las terminales de la fuente de energía. Esto se puede demostrar por la ecuación:

$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{R_{RELOJ}} + \frac{1}{R_{RADIO}} + \frac{1}{R_{LAMP}}}$$

Si el circuito corto es en el reloj:

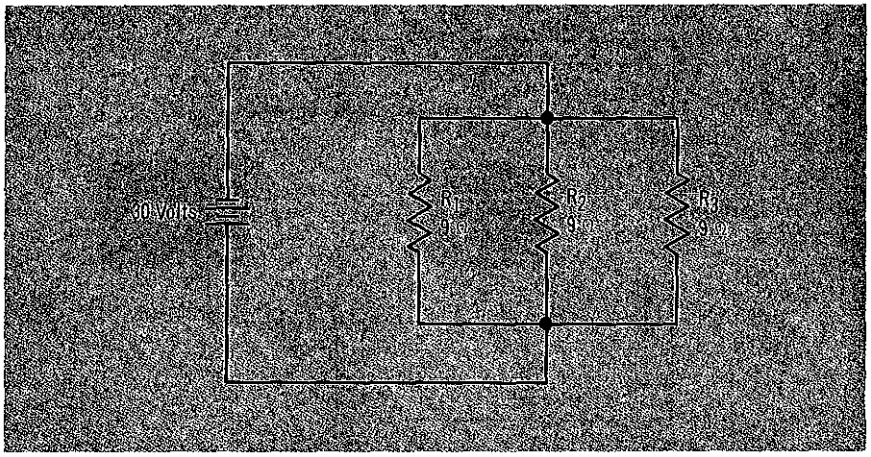
$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{0} + \frac{1}{R_{RADIO}} + \frac{1}{R_{LAMP}}}$$

$$= \frac{1}{\infty + \frac{1}{R_{RADIO}} + \frac{1}{R_{LAMP}}}$$

$$= \frac{1}{\infty} = 0$$

Los circuitos en paralelo generalmente presentan mayores probabilidades de corto circuitos dañinos que los circuitos en serie. La razón es que cada carga en paralelo está conectada *directamente* a las terminales de la fuente de energía. De manera que si cualquiera de las cargas sufre un corto, su resistencia entre las terminales de la fuente de energía se reduce prácticamente hasta cero. Pero si una carga de un circuito en serie sufre un corto circuito, la resistencia de las otras cargas en serie con ella, mantiene arriba de cero a la resisteneia del circuito.

problemas resueltos



Problema 9. ¿Cuál es la corriente total en este circuito?

Una manera de encontrar la corriente total sería calcular las tres corrientes ramales y luego sumar sus valores. Sin embargo, puesto que las tres resistencias son iguales, en este caso es más fácil determinar la resistencia total y luego calcular la corriente total a partir de ella. La resistencia total de resistencias iguales en paralelo se obtiene por la siguiente ecuación:

$$R_{TOT} = \frac{\text{valor de una resistencia}}{\text{número de resistencias}} = \frac{9}{3} = 3 \text{ ohms}$$

La corriente total se puede obtener mediante la ley de Ohm:

$$I_{TOT} = E/R_{TOT} = 30 \text{ volts}/3 \text{ ohms} = 10 \text{ amperes}$$

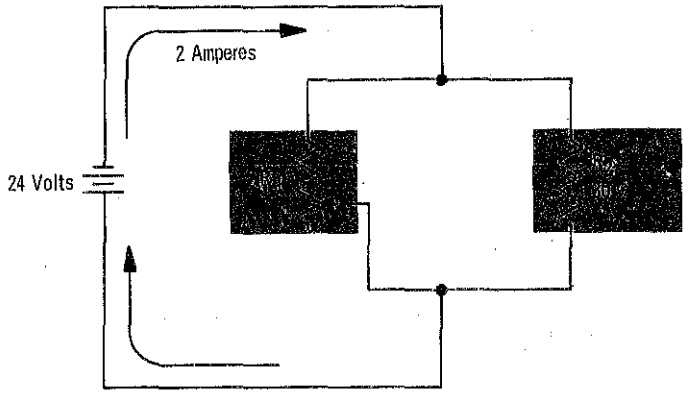
Problema 10. ¿Qué cantidad de corriente pasa a través de R_2?

R_2 es una de las ramas del circuito, ya que da una trayectoria separada para la corriente. Además, se sabe que la corriente de una rama depende de su resistencia, y de la tensión que le sea aplicada. Así pues, según la ley de Ohm:

$$I_2 = E/R_2 = 30 \text{ volts}/9 \text{ ohms} = 3.33 \text{ amperes}$$

Este problema también se podría haber resuelto simplemente observando el circuito. Puesto que las tres resistencias de rama son iguales, la corriente se debe dividir en partes iguales entre ellas. Esto significa que por cada rama pasará la tercera parte de la corriente total. Cuando la corriente total es de 10 amperes, la corriente de rama en R_2 es la tercera parte de 10, o sea 3.33 amperes.

problemas resueltos (cont.)



Problema 11. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?

Puesto que ambas resistencias de rama son desconocidas, no se puede seguir el método recíproco ni el método producto/suma para determinar la resistencia total. Pero la tensión aplicada y la corriente total se conocen, de manera que se puede aplicar la ley de Ohm para calcular la resistencia total.

$$R_{TOT} = E/I_{TOT} = 24 \text{ volts}/2 \text{ amperes} = 12 \text{ ohms}$$

Problema 12. Si se ajustara R_1 a un valor de 60 ohms, ¿cuál sería entonces la corriente total?

Deberá obtenerse la resistencia total de la combinación en paralelo antes de calcular la corriente total. Existen dos resistencias desiguales, de manera que se puede seguir el método producto/suma.

$$R_{TOT} = (R_1 \times R_2)/(R_1 + R_2) = (60 \times 30)/(60 \times 30)$$
$$= 1{,}800/90 = 20 \text{ ohms}$$

Conocidas la resistencia total y la tensión aplicada se puede calcular la corriente total según la ley de Ohm:

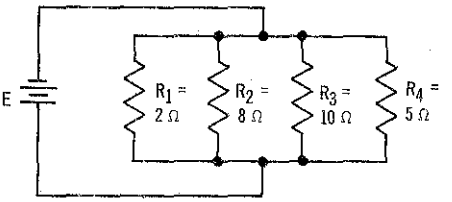
$$I_{TOT} = E/R_{TOT} = 24 \text{ volts}/20 \text{ ohms} = 1.2 \text{ amperes}$$

Problema 13. ¿Qué proporción de esta corriente total de 1.2 amperes fluye a través de R_2?

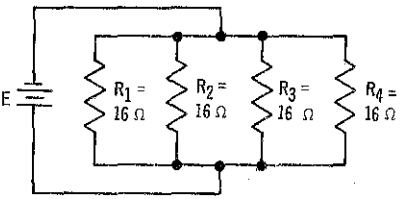
La tensión en R_2 es de 24 volts y su resistencia es de 30 ohms. Por lo tanto, la corriente en R_2 se obtiene gracias a la siguiente ecuación:

$$I = E/R_2 = 24 \text{ volts}/30 \text{ ohms} = 0.8 \text{ amperes}$$

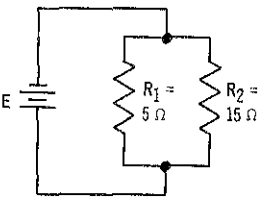
problemas resueltos (cont.)



Problema 14



Problema 15



Problema 16

Problema 14. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?

Hay más de dos resistencias en esta combinación en paralelo, de manera que se optará por el método recíproco.

$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{8} + \frac{1}{10} + \frac{1}{5}}$$

$$= \frac{1}{\frac{20}{40} + \frac{5}{40} + \frac{4}{40} + \frac{8}{40}} = \frac{1}{\frac{37}{40}} = 40/37 = 1\text{-}3/37 \text{ ohms}$$

Problema 15. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?

Se podría seguir el método recíproco para este circuito, pero como todas las resistencias tienen el mismo valor, es mucho más fácil seguir el método de resistencia igual. Por lo tanto,

$$R_{TOT} = \frac{\text{valor de una resistencia}}{\text{número de resistencias}} = \frac{16}{4} = 4 \text{ ohms}$$

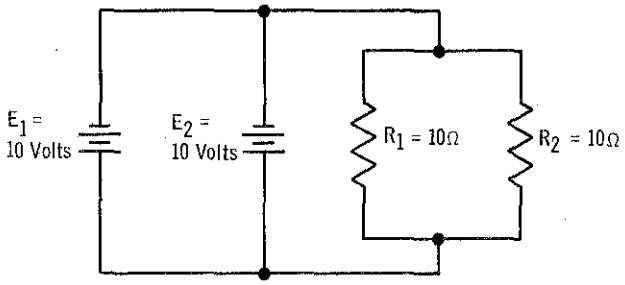
Problema 16. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?

Se puede seguir el método producto/suma ya que se tienen dos resistencias con valores diferentes.

$$R_{TOT} = (R_1 \times R_2)/(R_1 + R_2) = (5 \times 15)/(5 + 15) = 3.75 \text{ ohms}$$

También se puede resolver este problema por la regla de igual resistencia si se convierte R_1 en tres resistores de 15 ohms. Entonces, se tendría un total de 4 resistores de 15 ohms en el circuito, de manera que 15/4 es igual a 3.75 ohms.

problemas resueltos (cont.)



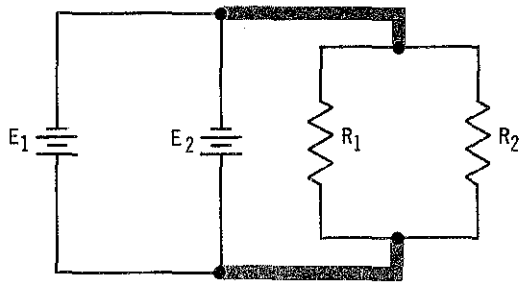
Problema 17. ¿Cuál es la corriente total del circuito?

Ahora ya debe ser posible observar simplemente estas dos resistencias en paralelo y calcular mentalmente su valor total. Son iguales, de manera que su valor total es la mitad del valor de cada una de ellas, o sea 5 ohms.

Una vez que se conoce la resistencia total, todo lo que se necesita conocer es la tensión de la fuente y entonces, se puede calcular la corriente total mediante de la ley de Ohm. Téngase presente que si se conectan fuentes de energía iguales en paralelo, la tensión combinada de salida es la misma que las tensiones individuales. Por lo tanto, la tensión de la fuente para este circuito, es de 10 volts. La corriente total del circuito es, entonces,

$$I_{TOT} = E/R_{TOT} = 10 \text{ volts}/5 \text{ ohms} = 2 \text{ amperes}$$

Y puesto que cada una de las fuentes de energía en paralelo suministra sólo una parte de la corriente total del circuito, cada batería de este circuito está suministrando 1 ampere.

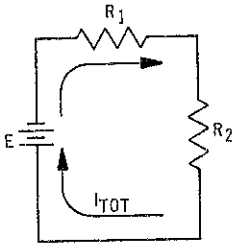


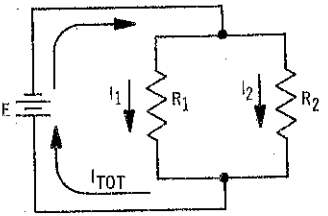
Problema 18. ¿Cómo tendría que conectarse un fusible en el circuito anterior para abrir todo el circuito en caso de quemarse?

El fusible hubiera tenido que conectarse en algún punto en que fluyera la corriente total del circuito. La trayectoria de la corriente total está ilustrada por las líneas coloreadas en el circuito.

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD DE
FERNANDO SALAS
"ACERVO"

comparación de circuitos en serie y en paralelo





	Circuito en serie	Circuito en paralelo
Corriente	Sólo hay una trayectoria para que circule la corriente.	Hay más de una trayectoria para que circule la corriente.
	La corriente en cada punto del circuito es la misma.	La corriente total es igual a la suma de las corrientes de rama.
Tensión	La suma de las caídas de tensión de las cargas es igual a la tensión de la fuente.	La tensión en cada rama es la misma que la tensión en la fuente.
Resistencia	La resistencia total es igual a la suma de las resistencias particulares.	La resistencia total es igual a la recíproca de la suma de las recíprocas de las resistencias individuales.
Potencia	La potencia total consumida es igual a la suma de los consumos de potencia de las cargas.	

resumen

☐ Cuando se conectan fuentes de energía en paralelo, cada fuente suministra parte de la corriente del circuito. ☐ Sólo fuentes de energía con la misma tensión de salida deben conectarse en paralelo. ☐ Cuando se conectan en paralelo dos fuentes de potencia con la misma tensión de salida, la salida de tensión de la combinación en paralelo es la misma que la de cada una de las fuentes.

☐ El consumo total de potencia en un circuito en paralelo se determina de la misma manera que en un circuito en serie: $P_{TOT} = EI_{TOT}$, $= I^2_{TOT}/R_{TOT}$, y $P_{TOT} = E^2/R_{TOT}$. ☐ La potencia total es igual a la suma de las potencias que se consumen en los circuitos de rama: $P_{TOT} = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots +$ etcétera.

☐ En un circuito en paralelo, aun cuando una de las trayectorias de corriente esté abierta, la corriente seguirá fluyendo en el circuito en tanto una o más de las otras trayectorias formen un circuito completo. ☐ Si un circuito en paralelo se abre en un punto a través del cual fluye la corriente total del circuito, todo el circuito se abre y todo flujo de corriente cesa. ☐ Para que un fusible proteja a un circuito en paralelo, debe instalarse en un punto donde fluya la corriente total, o bien instalar un fusible en cada rama.

preguntas de repaso

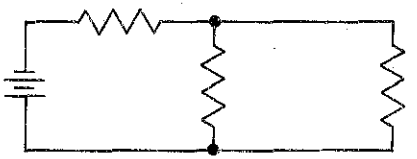
1. ¿Por qué no deben conectarse en paralelo fuentes de energías cuyas tensiones de salida sean diferentes?
2. Si se conectan en paralelo tres baterías de 10 volts, ¿cuál es la tensión total de salida?

Para las preguntas 3 a 8, *considere un circuito que conste de tres resistores en paralelo cuyos valores sean de 20, 50 y 80 ohms, conectados en una batería de 150 volts.*

3. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?
4. ¿Cuál es la corriente total y cuál la de las corrientes de rama?
5. ¿Cuál es la potencia total suministrada por la batería y cuál es la potencia consumida por cada resistor?
6. ¿Dónde debe colocarse un fusible para proteger el circuito?
7. ¿Protegería un fusible de 2 amperes a la batería contra un corto?
8. Si el resistor de 20 ohms se abriera, ¿cuál sería el valor de la corriente total del circuito?
9. Un circuito consta de 10 resistores de igual valor en paralelo. Si la potencia total disipada por el circuito es de 40 watts y si el circuito está alimentado por una batería de 10 volts, ¿cuál es el valor de cada resistor?
10. Para el circuito de la pregunta 9, si la salida de la batería baja a 5 volts, cuál es la potencia total disipada en el circuito?

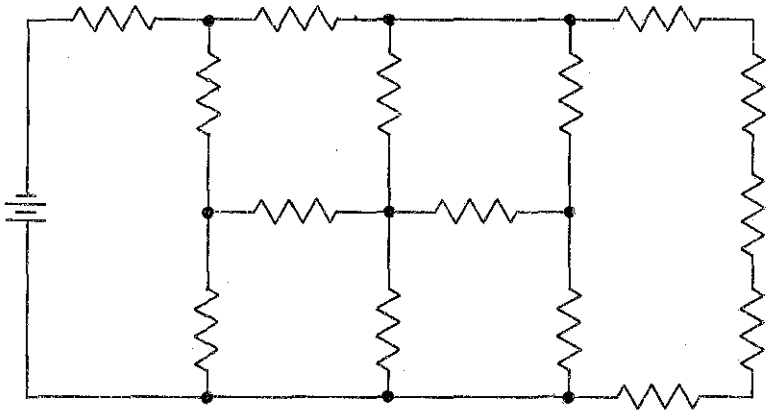
circuitos en serie-paralelo

A partir del material que se ha dado hasta ahora, debe ser fácil distinguir los circuitos tanto en serie como en paralelo. Pero existe otro tipo de circuito que tiene ramas, como circuitos en paralelo, y cargas o componentes en serie, como los circuitos en serie. A esto se le llama



Este es un circuito en serie-paralelo.

Los circuitos en serie-paralelo son una combinación de circuitos en serie y circuitos en paralelo. Pueden ser comparativamente simples y tener sólo unas cuantas componentes; pero también pueden tener muchas componentes y ser bastante complicados.

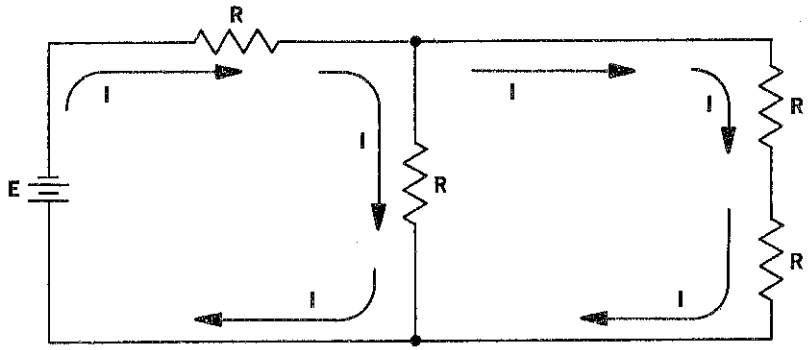


Y este es un circuito en serie-paralelo.

circuitos en *serie-paralelo*, puesto que es una combinación de los otros. Los métodos que se usarán para analizar circuitos en serie-paralelo son principalmente combinaciones de los que ya se conocen para circuitos en serie y circuitos en paralelo.

análisis de circuitos en serie-paralelo

En cualquier circuito de c-c existen ciertos factores básicos de interés. Según lo que se ha aprendido acerca de circuitos en serie y en paralelo, se sabe que estos factores son: 1) la corriente total de la fuente de energía y la corriente en cada parte del circuito; 2) la tensión de la fuente y de las caídas de tensión en cada parte del circuito, y 3) la resistencia total y la resistencia de cada parte del circuito. Una vez que se conocen estos factores del circuito, será fácil calcular los demás, tales como potencia total o potencia consumida en alguna parte del circuito.

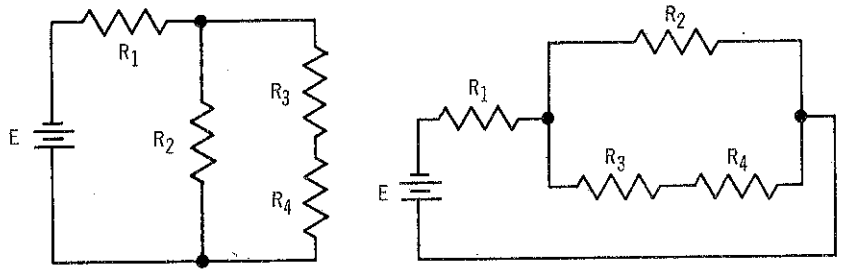


Cada rama y cada carga en un circuito en serie-paralelo tiene corriente, voltaje y resistencia. El circuito también tiene corriente total, voltaje total y resistencia total. Para encontrar cualquiera de estos valores, deben usarse las reglas para los circuitos en serie, así como las correspondientes a los circuitos en paralelo.

Es relativamente fácil determinar las cantidades de corriente, tensión y resistencia de circuitos en serie y en paralelo. Se conocen las resistencias de los circuitos en serie y en paralelo asimismo, cuando se trabaja con cualquiera de los dos tipos de circuito, sólo se siguen las reglas que se aplican a ese tipo. Por otra parte, en un circuito en serie-paralelo, algunas partes del circuito están *conectadas en serie* y algunas partes están *conectadas en paralelo*. Por lo tanto, en algunas partes del circuito en serie-paralelo se seguirán las reglas para circuitos en serie y en otras partes las reglas para circuitos en paralelo. Se puede apreciar que antes de que se pueda analizar o resolver un problema en que figuren circuitos en serie-paralelo, deben identificarse las partes del circuito que estén conectadas en serie y las que estén conectadas en paralelo. Algunas veces, esto es obvio si el circuito es simple. Sin embargo, muchas veces será necesario *volver a dibujar* el circuito, poniéndolo en una forma que sea más fácil tal identificación.

diagramas de circuitos en serie-paralelo

En un circuito en serie, la corriente es la misma en todos los puntos. A lo largo de un circuito paralelo existen uno o más puntos en que la corriente se divide y fluye en ramas separadas. Y en un circuito en serie-paralelo, se tienen tanto ramas separadas como cargas en serie. Por lo tanto, es fácil comprender que la forma más fácil de determinar si un circuito está en serie, en paralelo o en serie-paralelo, es comenzar en la terminal negativa de la fuente de energía y *rastrear* la trayectoria de la corriente en el circuito hasta regresar a la terminal positiva de la fuente de energía. Si la corriente no se divide en ningún punto, se trata de un circuito en serie. Si la corriente se divide en ramas separadas, pero no hay cargas en serie, se trata de un circuito en paralelo. Y si la corriente se divide en ramas separadas y también hay cargas en serie, se trata de un circuito en serie-paralelo. Cuando se sigue el circuito de esta manera, téngase presente que existen dos tipos de carga en serie. Uno de ellos consta de dos o más resistencias en una rama del circuito. El otro es cualquier resistencia a través de la cual fluya la corriente total del circuito. Se pueden apreciar estos dos tipos de carga en la ilustración.

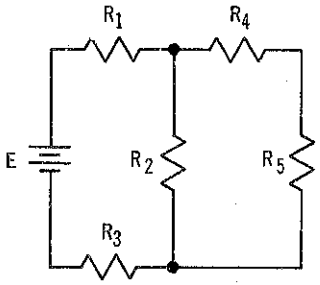


ESTE CIRCUITO se puede trazar en otra forma de manera que se convierte en ESTE CIRCUITO

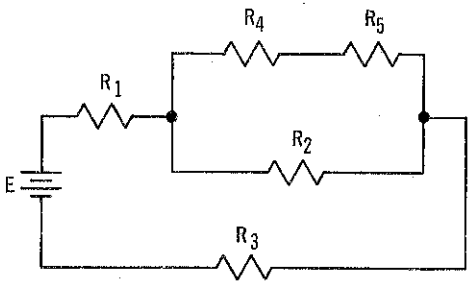
El análisis de un circuito en serie-paralelo, con frecuencia se puede simplificar si se vuelve a trazar el circuito, de manera que las ramas y las cargas en serie se puedan identificar fácilmente

Con frecuencia, después de determinar que un circuito está en serie-paralelo, resultará útil trazar nuevamente el circuito de manera que las ramas y las cargas en serie se puedan identificar más fácilmente. Esto será especialmente útil cuando se tenga que determinar la resistencia total del circuito. En esta página y la siguiente, aparecen ejemplos de cómo pueden dibujarse los circuitos.

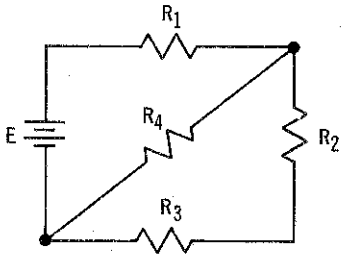
diagramas de circuitos en serie-paralelo (cont.)



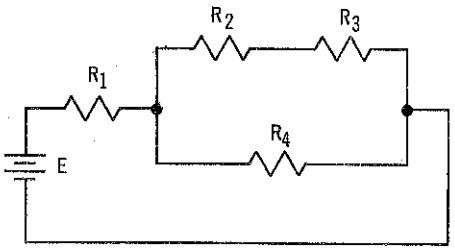
ESTE CIRCUITO se puede trazar en otra forma de manera que se convierte en



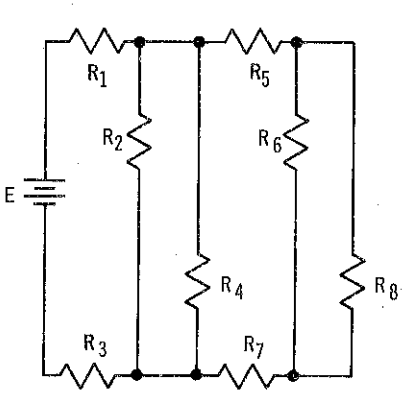
ESTE CIRCUITO



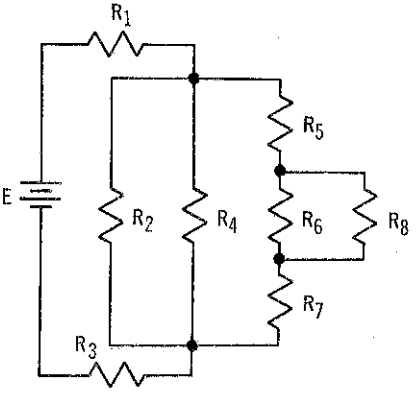
ESTE CIRCUITO se puede trazar en otra forma de manera que se convierte en



ESTE CIRCUITO



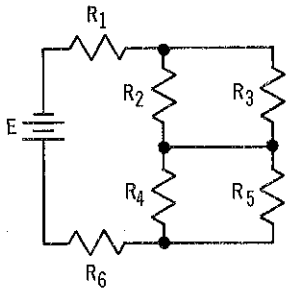
ESTE CIRCUITO se puede trazar en otra forma de manera que se convierte en



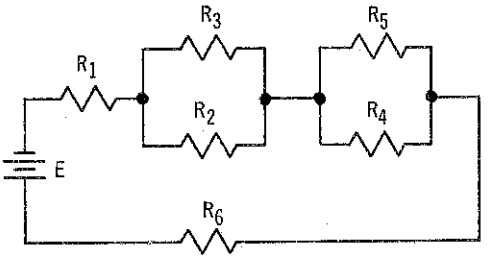
ESTE CIRCUITO

reducción de circuitos en serie-paralelo

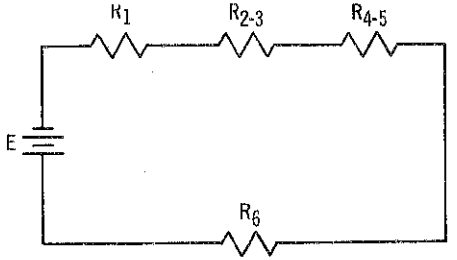
Con frecuencia, todo lo que se sabe de un circuito en serie-paralelo es la tensión aplicada al mismo y los valores de las resistencias individuales. Para encontrar la caída de tensión en cualquiera de las cargas o la corriente en cualquiera de las ramas, generalmente hay que saber la corriente total del circuito; pero, para encontrar la corriente total, es necesario conocer, antes que nada, la resistencia total del circuito. Para



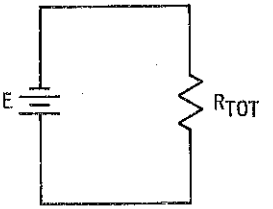
1. Si es necesario, puede trazarse el circuito de manera que todas las combinaciones en paralelo de resistencias y resistencias en serie se identifiquen fácilmente.



2. Para cada combinación en paralelo de resistencias, calcular su resistencia efectiva.



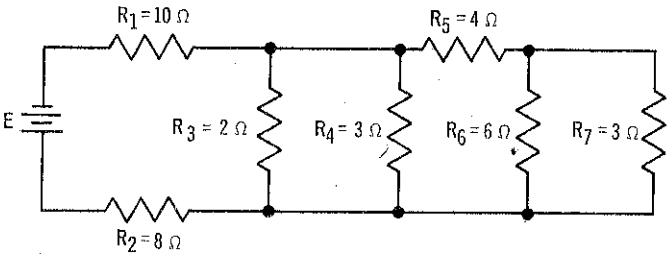
3. Substituir cada una de las combinaciones en paralelo con una resistencia cuyo valor sea igual a la resistencia efectiva de esa combinación. Esto da un circuito con todas las cargas en serie.



4. Encontrar la resistencia total de este circuito sumando las resistencias de las cargas en serie.

encontrar la resistencia total, se reduce el circuito a su forma *más simple,* que generalmente es *una resistencia* que forma un circuito en serie con la *fuente de tensión.* Este circuito en serie simple tiene la resistencia equivalente del circuito en serie-paralelo a partir del cual se obtuvo, de manera que también tiene la misma corriente total. Existen cuatro pasos básicos para reducir un circuito en serie-paralelo.

reducción de circuitos en serie-paralelo (cont.)



¿Cuál es el circuito en serie equivalente más simple de este circuito en serie-paralelo? El primer paso es trazar de nuevo el circuito de manera que puedan apreciarse fácilmente las partes en paralelo y las partes en serie. (Las referencias de figuras que siguen, corresponden a los diagramas de la página 2-105.) Una vez hecho esto, se puede ver que existen tres ramas principales: una es R_8, la segunda es R_4 y la tercera es R_5 y la combinación en paralelo de R_6 y R_7. Tienen que reducirse las tres ramas de manera que tengan una resistencia cada una. (Véase la fig. A.)

Se comienza por determinar la resistencia efectiva de R_6 y R_7 y poner este valor en el circuito en lugar de R_6 y R_7. (Véase la fig. B.)

$$R_{6-7} = (R_6 \times R_7)/(R_6 + R_7) = (6 \times 3)/(6 + 3) = 18/9 = 2 \text{ ohms}$$

Ahora se tienen dos resistencias en serie en la tercera rama. De manera que esta rama se reduce a una resistencia, sumando las dos resistencias en serie y substituyéndolas con una sola resistencia cuyo valor sea igual a su suma. (Véase la Fig. C.)

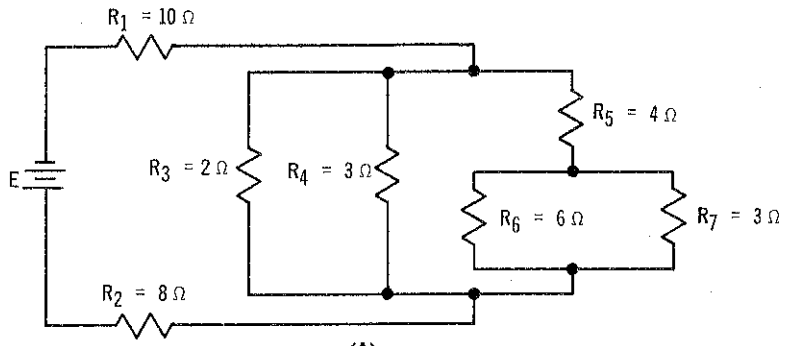
Ahora, cada una de las ramas tiene una sola resistencia. Estas tres resistencias en paralelo se pueden substituir con una resistencia cuyo valor se puede obtener gracias al método recíproco. (Véase la Fig. D.)

$$R_{3-4-5-6-7} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_{5-6-7}}} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6}}$$

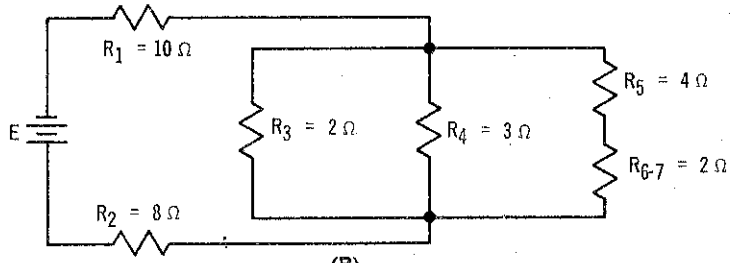
$$= \frac{1}{\frac{3}{6} + \frac{2}{6} + \frac{1}{6}} = \frac{1}{\frac{6}{6}} = 1 \text{ ohm}$$

El circuito se ha reducido ahora a un circuito en serie con tres resistencias en serie. Sumando los valores de las tres resistencias en serie, se puede reducir aún más hasta sólo tener una resistencia.

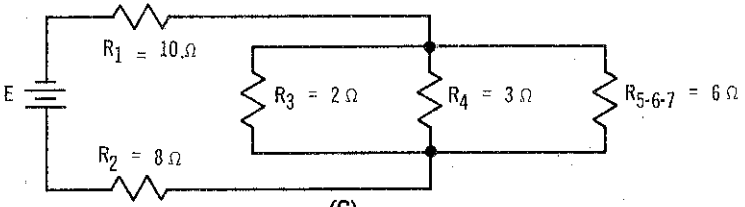
reducción de circuítos en serie-paralelo (cont.)



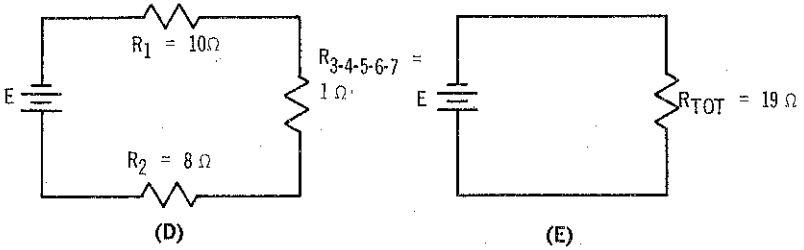
(A)



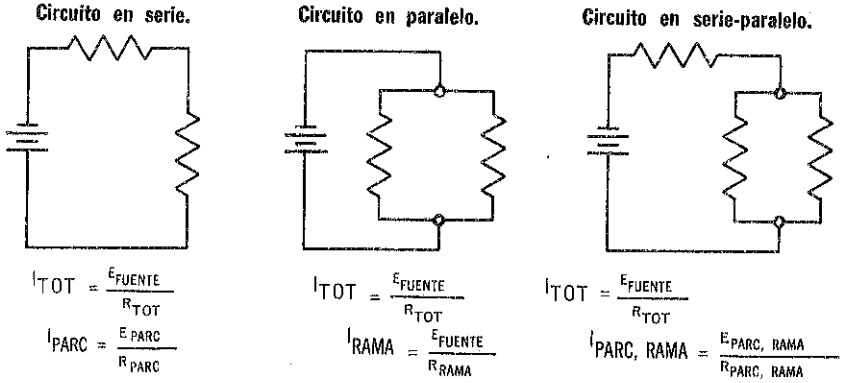
(B)



(C)



(D) (E)

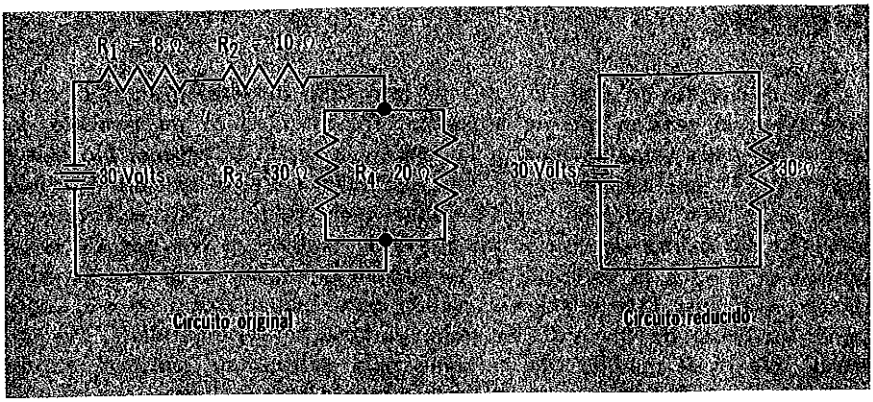


corriente

En todo circuito de c-c la corriente total es igual a la tensión de la fuente de energía dividida entre la resistencia total. En circuitos en serie, ésta es la única corriente. Por lo tanto, si se conoce la corriente total, también se conoce la corriente en cada parte del circuito. En circuitos paralelos, la corriente se divide y sigue más de una trayectoria. Por lo tanto, si sólo se conoce la corriente total del circuito, *no se conoce* la corriente en cada parte del circuito.

Las corrientes de rama generalmente se calculan aplicando la ley de Ohm a la tensión y a la resistencia de la rama. En circuitos en serie-paralelo, la corriente también se divide, siguiendo más de una trayectoria. Por lo tanto, como en los circuitos en paralelo, las corrientes de rama deben encontrarse mediante la ley de Ohm. Sin embargo, hay una diferencia importante: en ambos casos se aplica la ley de Ohm en la forma: $I = E/R$. Pero para circuitos en paralelo, la tensión en cada rama del circuito es la misma y es igual a la tensión de la fuente. Por lo tanto, si la tensión de la fuente y la resistencia de rama se conocen, se pueden determinar todas las corrientes en las ramas.

En circuitos en serie-paralelo, la tensión en cada rama generalmente *no* es la misma. De manera que, muy a menudo, antes de que se determine la corriente de rama, primero debe calcularse la tensión. De esto podría pensarse que si en primer lugar se calcularan todas las tensiones del circuito, se podrían usar para determinar todas las corrientes; sin embargo, no es así. El método que se usa generalmente consiste en calcular primero la corriente total del circuito. Luego, a partir de la corriente, se calculará la tensión en alguna parte o rama del circuito. Con esta tensión se calculará la corriente en esa parte o rama. Entonces se usará la corriente para calcular la tensión en alguna otra parte o rama. Mediante este método se determinarán finalmente todas las corrientes y tensiones en el circuito.



cómo calcular la tensión y la corriente

En el circuito en serie-paralelo, calcular la corriente a través de las resistencias y las caídas de tensión en ellas. En primer lugar, se reduce el circuito a su forma más simple, comenzando por reducir la combinación en paralelo de R_3 y R_4 a una resistencia equivalente, según el método producto/suma.

$$R_{3-4} = (R_3 \times R_4)/(R_3 + R_4) = (30 \times 20)/(30 + 20)$$
$$= 600/50 = 12 \text{ ohms}$$

Ahora el circuito original se ha reducido a un circuito en serie con tres resistencias: 8, 10 y 12 ohms. Por lo tanto, el circuito completamente reducido tiene una resistencia de 30 ohms.

Para determinar la corriente total en este circuito se puede aplicar la ley de Ohm:

$$I = E/R = 30 \text{ volts}/30 \text{ ohms} = 1 \text{ ampere}$$

Volviendo nuevamente al circuito original, puede apreciarse que esta corriente de 1 ampere fluye a través de las resistencias R_1 y R_2 y luego se separa hacia R_3 y R_4. Puesto que se conoce la corriente en R_1 y R_2, se calcularán las caídas de tensión en ellas mediante la ley de Ohm:

$$E_{R1} = IR_1 = 1 \text{ ampere} \times 8 \text{ ohms} = 8 \text{ volts}$$
$$E_{R2} = IR_2 = 1 \text{ ampere} \times 10 \text{ ohms} = 10 \text{ volts}$$

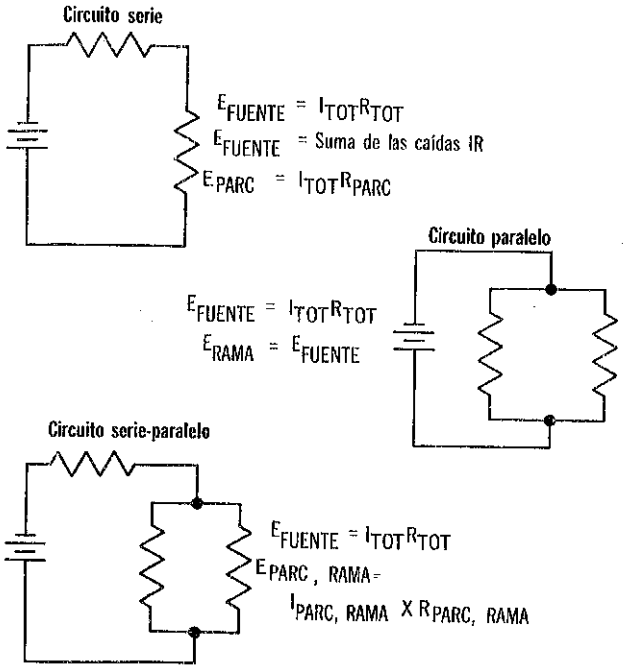
Si hay una caída de 8 volts en R_1 y 10 volts en R_2, quedan 12 volts en la combinación de R_3 y R_4. Se puede determinar la corriente en cada una de ellas de la siguiente manera:

$$I_{R3} = E/R_3 = 12 \text{ volts}/30 \text{ ohms} = 0.4 \text{ ampere}$$
$$I_{R4} = E/R_4 = 12 \text{ volts}/20 \text{ ohms} = 0.6 \text{ ampere}$$

Ahora se sabe que, al sumarse estas corriente de rama, deben totalizar la corriente de 1 ampere, de manera que se pueden comprobar los resultados, sumándolos.

tensión

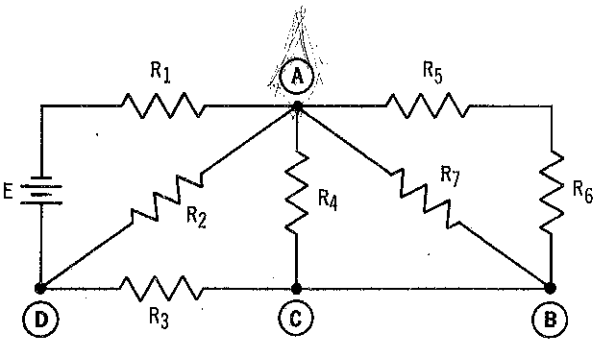
En un circuito en serie, la suma de las caídas de tensión en el circuito es igual a la tensión que se le aplica. En un circuito en paralelo, la tensión en cada rama es igual a la tensión aplicada al mismo. No existe una relación tan sencilla como ésta para un circuito en serie-paralelo entre la tensión aplicada y las tensiones del circuito. Sin embargo, se sabe que las caídas de tensión en cualquier resistencia o grupo de resistencias es igual a la corriente en la resistencia multiplicada por el valor de la resistencia. Esta relación es válida para todo circuito de c-c, independientemente de que esté en serie, paralelo, o serie-paralelo. En general, éste es el método que se sigue para determinar tensiones en un circuito serie-paralelo.

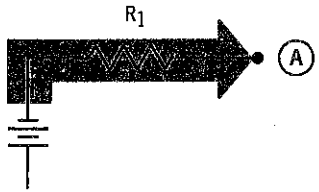


Recuérdese que por lo general no se pueden calcular todas las corrientes o todas las tensiones de un circuito en serie-paralelo usando sólo la corriente total y la tensión aplicada. Esto debe hacerse a lo largo del circuito carga por carga y rama por rama, determinando la corriente de cada carga o rama y la tensión aplicada a la misma, antes de continuar a la siguiente. Naturalmente, al adquirir más experiencia y práctica, se desarrollarán simplificaciones en los métodos que permitirán eliminar parte del trabajo.

problemas resueltos

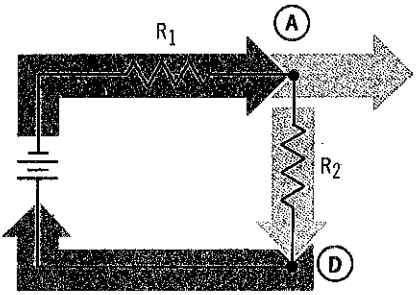
Problema 19. Retrasar el circuito de manera que las partes en serie-paralelo aparezcan más claramente.

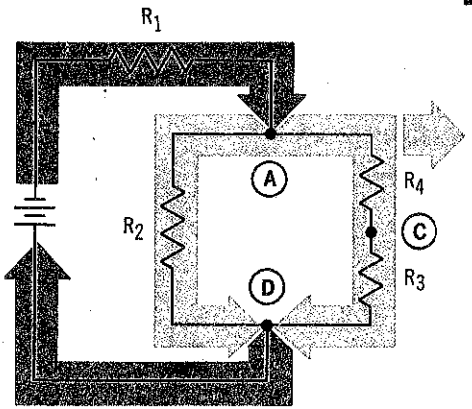




La corriente sale de la terminal negativa de la batería, y esta corriente total pasa a través de R_1 al punto A

La corriente se divide en el punto A, y sigue cuatro trayectorias separadas. Una de estas trayectorias es a través de R_2 al punto D y de ahí a la terminal positiva de la batería



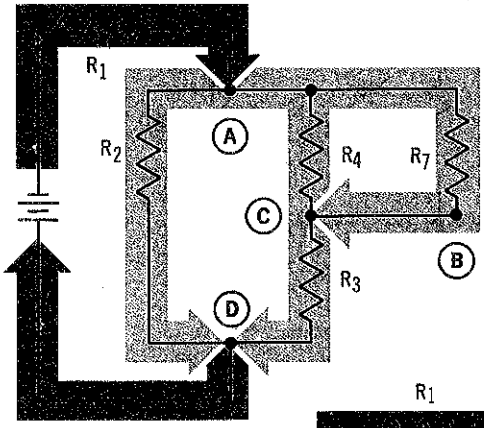


Una segunda trayectoria del punto A es a través de R_4 al punto C y a través de R_3 al punto D y de ahí a la terminal positiva de la batería

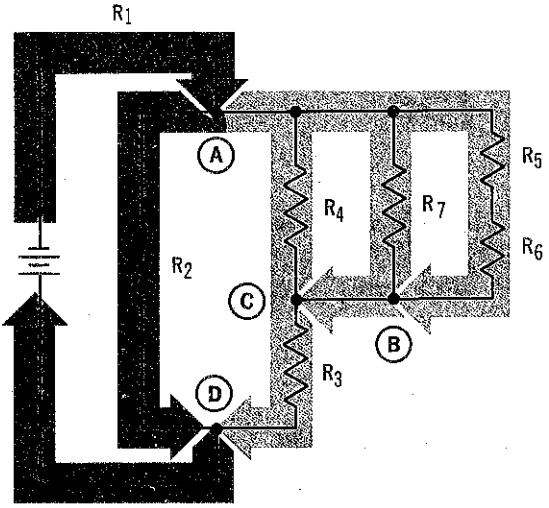
El circuito se simplifica aún más en la página 2-110.

problemas resueltos (cont.)

El circuito de la página 2-109 se simplifica aún más, como sigue:

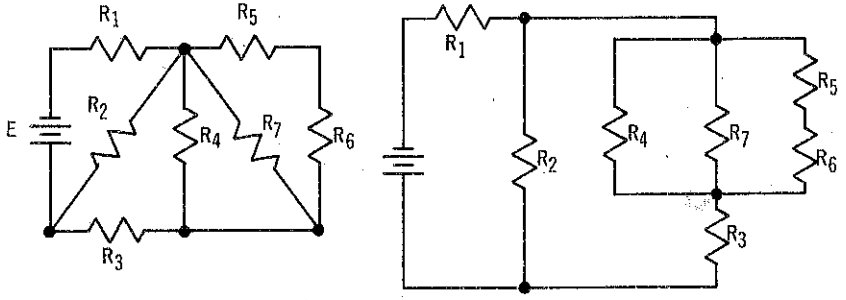


Una tercera trayectoria del punto A es a través de R_7 al punto B, y luego al punto C, donde se une a la trayectoria a través de R_4

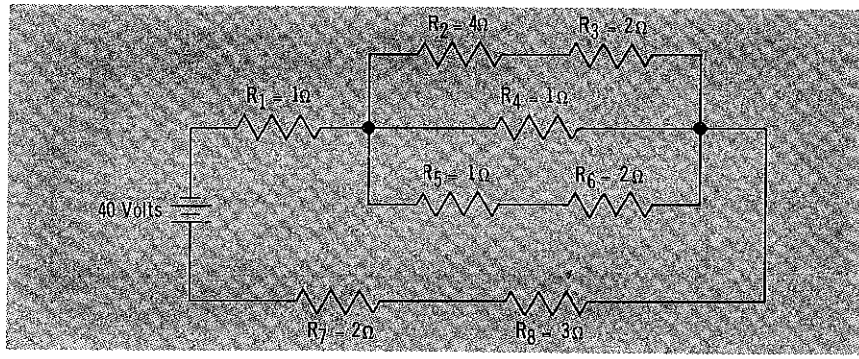


Una cuarta trayectoria del punto A es a través de R_5 y R_6 al punto B, en donde se une a la trayectoria a través de R_4 y a la trayectoria a través de R_7

Estos dos circuitos son equivalentes



problemas resueltos (cont.)



Problema 20. ¿Cuál es la corriente total que fluye en el circuito?

Para hacer esto, se reduce el circuito a sólo una resistencia que sea equivalente al valor total de todas las resistencias en serie y en paralelo del circuito. Se puede apreciar que hay tres ramas en el circuito. Una de ellas atraviesa R_2 y R_3; la segunda R_4, y la tercera R_5 y R_6. Cada una de estas ramas deberá reducirse primero. R_2 y R_3 están en serie, de manera que su resistencia total es $4 + 2 = 6$ ohms. R_5 y R_6 también están en serie y su resistencia total es $1 + 2 = 3$ ohms.

Entonces, las resistencias de las tres ramas son 6 ohms, 1 ohm y 3 ohms y la resistencia efectiva de las tres ramas se puede obtener mediante el método recíproco para calcular resistencias en paralelo:

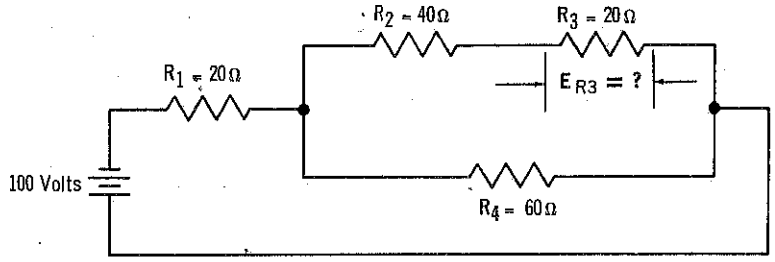
$$R_{EFF} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{1} + \frac{1}{3}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{6}{6} + \frac{2}{6}}$$

$$= \frac{1}{\frac{9}{6}} = 0.667 \text{ ohms}$$

Ahora se substituirán las resistencias en paralelo por la resistencia equivalente de 0.667 ohms y el resultado es un circuito en serie con cuatro resistencias. Puesto que se trata de un circuito en serie, la resistencia total es 6.667 ohms. Esto reduce el circuito original a otro más simple con 40 volts aplicados a 6.667 ohms. Entonces, la corriente total se determina según la ley de Ohm:

$$I = E/R = 40 \text{ volts}/6.667 \text{ ohms} = 6 \text{ amperes}$$

problemas resueltos (cont.)



Problema 21. ¿Cuál es la caída de tensión en R_3 en el circuito?

Para encontrar la caída de tensión en R_3, debe conocerse la corriente que pasa por ella. No se da la corriente, de modo que primero deberá calcularse la corriente total del circuito y luego determinar qué parte de la corriente total pasa a través de R_3.

Se comenzará por reducir el circuito a una resistencia equivalente única. Hay dos ramas en paralelo: una es R_2 y R_3 y la otra es R_4. Se conoce la resistencia total de la rama R_4 y se encontrará el total de la rama $R_2 - R_3$ sumando las resistencias; $40 + 20 = 60$ ohms. La resistencia total de cada rama es de 60 ohms, de manera que la resistencia efectiva de la combinación paralelo es la mitad del valor de una sola, o sea 30 ohms. La resistencia de todo el circuito es de 30 ohms más los 20 ohms de R_1, o sea, 50 ohms. La corriente total del circuito se puede determinar mediante la ley de Ohm:

$$I_{TOT} = E/R_{TOT} = 100 \text{ volts}/50 \text{ ohms} = 2 \text{ amperes}$$

Esta corriente total fluye a través de R_1 y tiene una caída de tensión en esa resistencia:

$$E_{R1} = IR_1 = 2 \text{ amperes} \times 20 \text{ ohms} = 40 \text{ volts}$$

Esto significa que la diferencia entre 40 volts y la tensión de la fuente, o sea 60 volts, debe aplicarse a las dos ramas en paralelo.

Con 60 volts en cada rama, puede determinarse la corriente en la rama que contiene a R_2 y R_3, de la siguiente manera:

$$I = E/R_{2-3} = 60 \text{ volts}/60 \text{ ohms} = 1 \text{ ampere}$$

Esta corriente fluye a través de R_2 y R_3, ya que están en serie. Se conoce la corriente en R_3 y, por lo tanto, se puede calcular la caída de tensión ahí por medio de la ley de Ohm:

$$E_{R3} = IR_3 = 1 \text{ ampere} \times 20 \text{ ohms} = 20 \text{ volts}$$

resumen

☐ Se puede identificar un circuito en serie-paralelo, rastreando la trayectoria de la corriente. Si la corriente se divide en ramas separadas y también hay cargas en serie, se trata de un circuito en serie-paralelo. Toda resistencia a través de la cual fluye la corriente total estará en la parte en serie del circuito. ☐ Toda resistencia a través de la cual sólo fluya parte de la corriente total, está en la parte del circuito conectada en paralelo. ☐ En un circuito en serie-paralelo, se aplican todas las leyes de los circuitos en serie y en paralelo.

☐ Con frecuencia los circuitos en serie-paralelo se reducen a su forma más simple para resolver las cantidades eléctricas. ☐ Generalmente la forma más simple es una resistencia que un circuito en serie con la fuente de tensión. ☐ Cuatro pasos básicos en la reducción de circuitos en serie-paralelo son: dibujar de nuevo el circuito, si es necesario de manera que todas las combinaciones de resistencias en paralelo y resistencias en serie se puedan identificar fácilmente. ☐ Calcular la resistencia efectiva de cada combinación de resistencias en paralelo. ☐ Substituir cada combinación en paralelo con una resistencia igual a la resistencia efectiva de la combinación, que tenga como resultado un circuito en serie. ☐ Determinar la resistencia total del circuito sumando las resistencias de todas las cargas en serie.

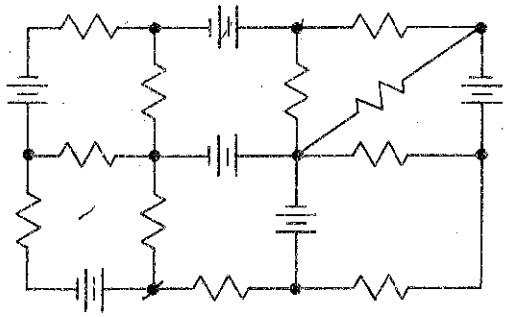
☐ La caída total de tensión en un circuito en serie-paralelo es igual a la tensión de la fuente. ☐ Las corrientes de rama en una parte en paralelo de un circuito se pueden determinar calculando la caída de tensión en la parte en paralelo y luego aplicando la ley de Ohm. Esta caída de tensión es igual a la corriente total multiplicada por la resistencia en serie equivalente de la parte en paralelo. ☐ La potencia disipada por cada carga de un circuito en serie-paralelo se obtiene mediante las ecuaciones comunes de potencia. ☐ La potencia total es igual a la potencia desarrollada por la resistencia total equivalente del circuito o a la suma de las potencias consumidas en cada carga.

preguntas de repaso

1. Definir *circuitos en serie, paralelo* y *serie-paralelo.*

Para las preguntas 2 a 10, *básese el circuito de la página 2-104 considerando todos los resistores como de 4 ohms y una fuente de energía de 100 volts.*

2. ¿Cuál es la resistencia total del circuito?
3. ¿Cuál es la corriente total del circuito?
4. ¿Qué cantidad de corriente hay en R_2?
5. ¿Cuánta es la tensión en R_1?
6. ¿Cuánta es la tensión en R_3 y en R_7?
7. ¿Cuánta es la corriente en R_4?
8. ¿Cuánta es la corriente en R_6?
9. ¿Cuánta es la potencia consumida por R_5?
10. ¿Cuál es la potencia total consumida en el circuito?



Los voltajes de corrientes en este circuito no se pueden encontrar aplicando la ley de Ohm. Existen demasiadas ramas y demasiadas fuentes de energía. Sin embargo, empleando las leyes de Kirchhoff, pueden calcularse todos los voltajes y corrientes.

leyes de kirchhoff

En todos los circuitos que se han examinado hasta ahora, la ley de Ohm ha descrito las relaciones existentes entre corriente, tensión y resistencia. Sin embargo, todos los circuitos estudiados han sido *relativamente simples*. Sin embargo, existen circuitos que son tan complejos que no pueden resolverse mediante la ley de Ohm. Estos circuitos tienen *muchas ramas* o *muchas fuentes de potencia*, y la ley de Ohm sería o impráctica o bien imposible de aplicar. Por lo tanto, se necesitan otros métodos para resolver circuitos complejos. Sin embargo, cualquier método que se use, no debe violar la ley de Ohm, ya que ésta es la base misma de la teoría de los circuitos de c-c.

Se han desarrollado métodos para resolver circuitos complejos, basados en los experimentos de un físico alemán llamado Gustav Kirchhoff. Alrededor de 1857, Kirchhoff llegó a dos conclusiones como resultado de sus experimentos. Estas conclusiones, conocidas como *leyes de Kirchhoff*, se pueden enunciar como sigue:

Ley de Kirchhoff de tensión: La suma de las caídas de tensión en cualquier trayectoria cerrada es igual a la suma de las fuerzas electromotrices en esa tra toria.

Ley de Kirchhoff de corriente: La corriente que llega a determinado punto de unión, o nodo, en un circuito es igual a la corriente que abandona ese punto.

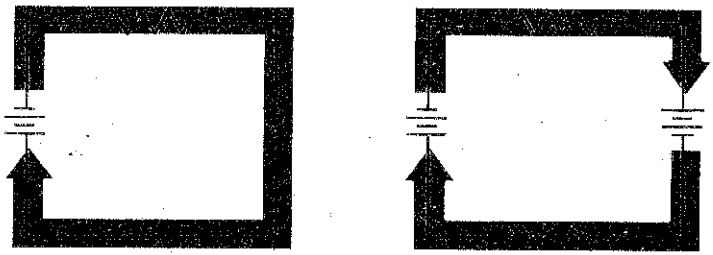
Al aplicar las leyes de Kirchhoff, no importa a cuál de ellas se le llame primera y a cuál segunda. Puesto que, en la práctica, la ley de Kirchhoff de tensión generalmente se aplica primero, se le llamará primera ley de Kirchhoff. La ley de Kirchhoff de corriente en consecuencia, será mencionada como segunda ley.

De acuerdo con lo que ya se sabe acerca de la teoría de los circuitos, estas dos leyes pueden parecer obvias. A pesar de su aparente sencillez, constituyen herramientas muy eficaces cuando se trata de resolver circuitos difíciles y complejos. Aunque estas leyes son sencillas en sí, las matemáticas que se necesitan para aplicarlas se van complicando conforme los circuitos se hacen más complejos. Debido a esto, en la presente exposición, tales leyes sólo se usarán para resolver circuitos de relativamente poca complejidad.

ley de kirchhoff de tensión

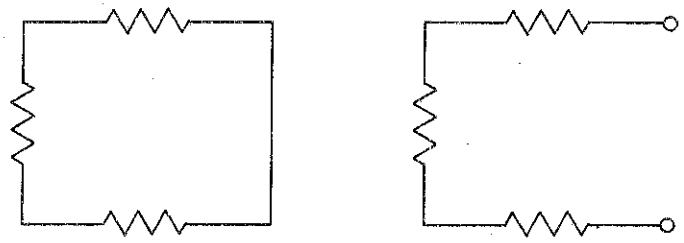
Con frecuencia, la ley de Kirchhoff de tensión se escribe en muchas formas diferentes; pero, independientemente de la forma que tenga, expresa un mismo hecho. Indica la relación entre las *caídas de tensión* en cualquier trayectoria cerrada de un circuito y las fuentes de tensión en esa trayectoria. Los *totales* de estas dos cantidades *siempre son iguales*. Esto se puede expresar en forma de ecuación como: $\sum E_{FUENTE} = \sum IR$, en donde el símbolo $\sum$, que es la letra griega *sigma* significa *"suma de"*.

Estos circuitos SON mallas



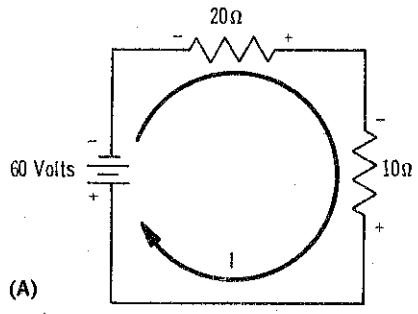
La Ley de Voltaje de Kirchhoff sólo se puede aplicar a mallas cerradas. Una malla cerrada debe satisfacer dos condiciones:

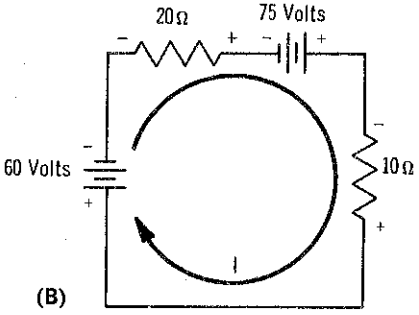
1) **Debe tener una o más fuentes de voltaje**
2) **Debe tener una trayectoria completa para que la corriente fluya de cualquier punto en la malla, regresando al mismo**



Estos circuitos NO SON mallas

Tengamos presente que en un circuito en serie simple, la suma de las caídas de tensión es igual a la tensión aplicada al circuito. Esta es en realidad la ley de Kirchhoff de tensión aplicada al caso más simple posible; es decir, cuando sólo hay una trayectoria y una fuente de tensión en esa trayectoria.





aplicación de la ley de kirchhoff de tensión

En el caso de circuitos en serie simples la ley de Kirchhoff de tensión corresponde a la ley de Ohm. Para determinar la cantidad de corriente en el circuito (A) mediante la ley de Kirchhoff de tensión, simplemente se usa la ecuación: $E_{FUENTE} = IR$. Sólo hay una fuente de tensión o fem en la trayectoria y dos caídas de tensión o IR. Por lo tanto, la ecuación se convierte en:

$$60 = 20I + 10I$$
$$60 = 30I$$
$$I = 60/30 = 2 \text{ amperes}$$

En el problema anterior, se conocía la dirección en que fluía la corriente antes de resolver el problema. Cuando existe más de una fuente de tensión, puede suceder que no se conozca la dirección de la corriente. En este caso, se supone una dirección arbitraria al comenzar el problema. Todas las fuentes que facilitan la circulación de la corriente en la dirección presupuesta son positivas y las que se oponen a la corriente en esta dirección, son negativas. La respuesta al problema será positiva si la dirección que se supuso originalmente para la corriente fue la correcta, y negativa si se supuso erróneamente. En cualquier caso, se obtendrá la magnitud correcta de la corriente.

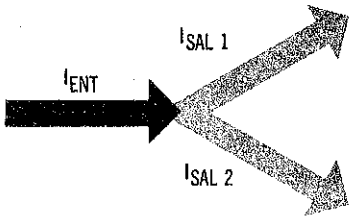
Por ejemplo, ¿cuál es la corriente en el circuito (B)? Si se supone que la corriente fluye en la dirección mostrada, la ecuación para la ley de Kirchhoff de tensión es:

$$\Sigma E_{FUENTE} = \Sigma IR$$
$$60 - 75 = 20I + 10I$$
$$-15 = 30I$$
$$I = -15/30 = -0.5 \text{ amperes}$$

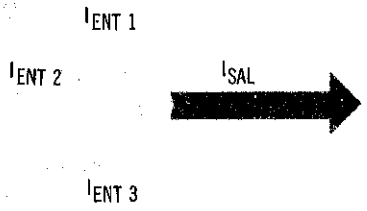
El resultado es negativo, de manera que, en realidad, la corriente es de 0.5 amperes en la dirección opuesta a la que se supuso.

ley de kirchhoff de corriente

La *ley de corriente,* igual que la ley de tensión, con frecuencia se enuncia de diferentes formas. Independientemente de la forma de su enunciado, su significado no cambia. Y la ley es: en cualquier punto de unión o nodo de un circuito, la corriente *que llega* es *igual* a la corriente que sale. Esto debe ser obvio para el que ha estudiado en el volumen 1. La corriente no puede *acumularse* u *originarse* en un punto o nodo. Por cada electrón que llega a un punto, debe salir otro. De no ser así, se originaría un potencial y la corriente finalmente cesaría cuando el potencial fuese igual al de la fuente de energía. Por lo tanto, si llega una corriente de 10 amperes a un punto que tiene dos trayectorias que salen de él, los 10 amperes se dividirán entre las dos trayectorias; pero el total de 10 amperes deberá salir del punto. Ya el lector estará familiarizado con la aplicación más obvia de la ley de Kirchhoff de corriente, a partir de circuitos paralelos. Es decir, la suma de las corrientes de las ramas es igual a la corriente total que entra a las ramas y también a la corriente total que sale de las ramas.



$$I_{ENT} = I_{SAL\ 1} + I_{SAL\ 2}$$



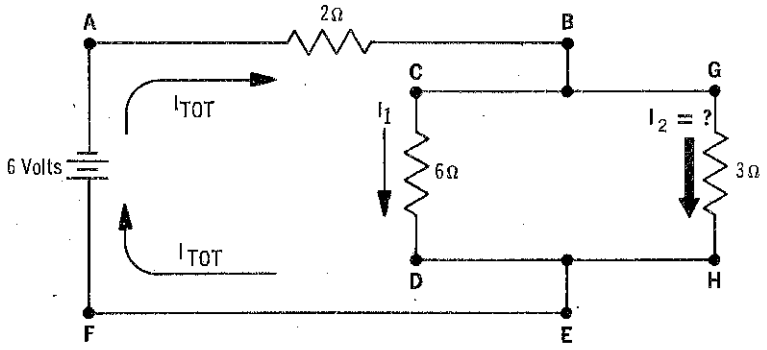
$$I_{ENT\ 1} + I_{ENT\ 2} + I_{ENT\ 3} = I_{SAL}$$

La ley de corriente de Kirchhoff establece que la corriente no puede acumularse en un punto. La corriente que sale de un punto debe ser igual a la corriente que entra al mismo. Por lo tanto, si se asigna una polaridad positiva a la corriente que entra a un punto y polaridad negativa a la corriente que sale de él, la suma algebraica de las corrientes en cualquier punto, es igual a cero:

$$\Sigma I_{ENT} - \Sigma I_{SAL} = 0$$

o $$\Sigma I_{ENT} = \Sigma I_{SAL}$$

La ley de Kirchhoff de corriente no suele aplicarse sola, sino junto con la ley de tensión al resolver un problema. Esto se demuestra en las páginas que siguen.



aplicación de las leyes de kirchhoff

Encontrar la corriente que fluye a través de la resistencia de 3 ohms en el circuito, mediante las leyes de Kirchhoff. Existen dos trayectorias en este circuito: una es ABCDEFA y la otra es ABGHEFA. Primero se aplicará la ley de Kirchhoff de tensión a ambas trayectorias:

$$2I_{TOT} + 6I_1 = 6 \quad (1)$$
$$2I_{TOT} + 3I_2 = 6 \quad (2)$$

Ahora bien, puesto que $I_{TOT} = I_1 + I_2$, si se substituye $(I_1 + I_2)$ en lugar de I_{TOT} en las ecuaciones (1) y (2) y se simplifica, se obtendrá lo siguiente:

$$8I_1 + 2I_2 = 6 \quad (3)$$
$$2I_1 + 5I_2 = 6 \quad (4)$$

Ahora se tienen dos ecuaciones y dos incógnitas, y debe eliminarse I_1 para encontrar I_2. Una forma para hacer esto es multiplicar la ecuación (4) por 4 y restar la ecuación (3) del resultado:

$$\begin{array}{r} 8I_1 + 20I_2 = 24 \\ -(8I_1 + 2I_2 = 6) \\ \hline 18I_2 = 18 \end{array}$$

Se tiene ahora una ecuación con sólo I_2, la corriente que se busca. De manera que la corriente I_2 a través del resistor de 3 ohms es:

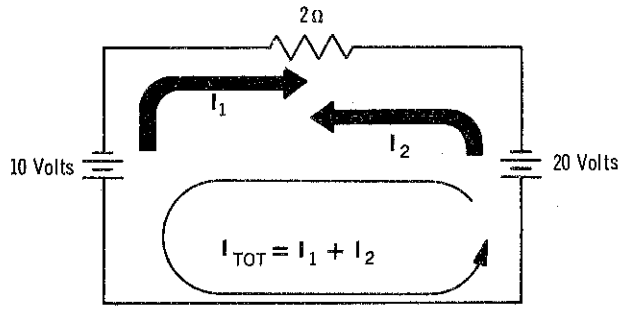
$$I_2 = 18/18 = 1 \text{ ampere}$$
$$18I_2 = 18$$

Podría haberse resuelto este problema simplemente mediante la ley de Ohm; pero se resolvió según las leyes de Kirchhoff, a fin de que el lector aprenda las técnicas que se aplican para resolver circuitos complejos cuando no se pueda usar la ley de Ohm.

principio de superposición

Cuando hay más de una fuente de energía en un circuito o trayectoria (malla), la corriente será afectada por *cada una* de las fuentes. Se han examinado dos maneras de encontrar la corriente en estos casos. Una de ellas es determinar la tensión combinada de las fuentes y luego usar la ley de Ohm para determinar la cantidad de corriente. La otra consiste en usar la ley de Kirchhoff de tensión en la malla. Un tercer método que puede usarse se basa en el hecho de que la corriente en cualquier *punto* es la suma de las corrientes producidas por *cada una* de las fuentes de energía. Por lo tanto, se puede calcular la corriente que existiría si sólo se tuviera una fuente de energía y se hace esto para cada una de las fuentes, la suma de éstas será la corriente total que se tendrá si todas las fuentes actúan simultáneamente en el circuito. A esto se le llama principio de *superposición*. Deben darse cuatro pasos para aplicar el principio:

1. Sustituir todas las fuentes de energía excepto una, con un corto circuito y suponer una dirección de flujo de corriente.
2. Calcular la corriente que se desea con esa fuente en el circuito.
3. Hacer lo mismo para cada una de las demás fuentes de energía en el circuito.
4. Sumar las corrientes que se han determinado. Las corrientes en la dirección de la corriente supuesta originalmente son positivas. Las de dirección opuesta son negativas. Si la corriente total resulta negativa, la dirección supuesta era la errónea.



Para el circuito mostrado, se supondrá una dirección para la corriente total. Así pues,

$$I_1 = E_1/R = -10 \text{ volts}/2 \text{ ohms} = -5 \text{ amperes}$$
$$I_2 = E_2/R = 20 \text{ volts}/2 \text{ ohms} = 10 \text{ amperes}$$
$$I_{TOT} = I_1 + I_2 = -5 + 10 = 5 \text{ amperes}$$

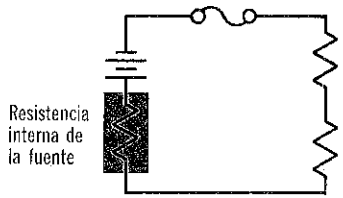
resistencia interna de las fuentes de energía

Se recordará de la página 2-20 que toda fuente de energía tiene alguna *resistencia interna* que se opone al flujo de la corriente. Normalmente, esta resistencia es muy pequeña, y casi no tiene efecto en la operación del circuito. Por esta razón, la resistencia interna de la fuente de energía ha sido ignorada en todos los circuitos de este volumen. Cuando la resistencia interna de una fuente debe ser considerada en el circuito, generalmente se representa en serie con la fuente. Y, en su mayor parte, el efecto que tiene en un circuito es el de una *resistencia adicional* en la misma conectada en serie con la fuente de energía.

Toda resistencia en un circuito sufre una caída de tensión cuando hay flujo de corriente. Puesto que la resistencia interna de la fuente está dentro de ella, su caída de tensión también es *interna*. Esta caída interna se resta de la tensión de salida de la fuente. Y puesto que la cantidad de cualquier caída de tensión se resuelve por la ecuación $E = IR$, cuanto más alta sea la resistencia interna de una fuente, o sea mayor la cantidad de corriente que conduzca, mayor será su caída interna de tensión y más baja su tensión de salida.

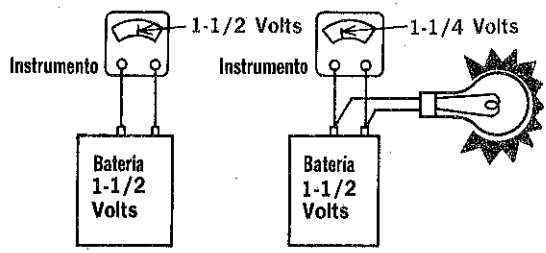
Para algunas fuentes de energía, la salida de corriente está limitada por la caída interna de tensión. Si se trata de tomar más de cierta cantidad de corriente de estas fuentes, el aumento de corriente causa un aumento en la caída interna de tensión, que reduce la tensión de salida y, en consecuencia, hace bajar la corriente.

Cuando las fuentes de energía se conectan en paralelo, sus resistencias internas también están en paralelo. Por lo tanto, la resistencia interna efectiva es inferior a la de cualquiera de las fuentes.



La resistencia interna de una fuente de energía generalmente está indicada en un diagrama del circuito por una pequeña resistencia en serie con la fuente

La resistencia de la fuente se opone al flujo de corriente como cualquier otra resistencia en el circuito. También reduce el voltaje de salida de la fuente debido a la caída de voltaje interno que causa cuando circula la corriente

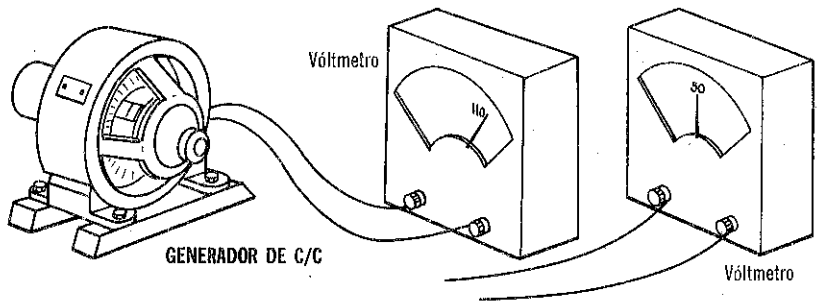


fallas en fuentes de energía

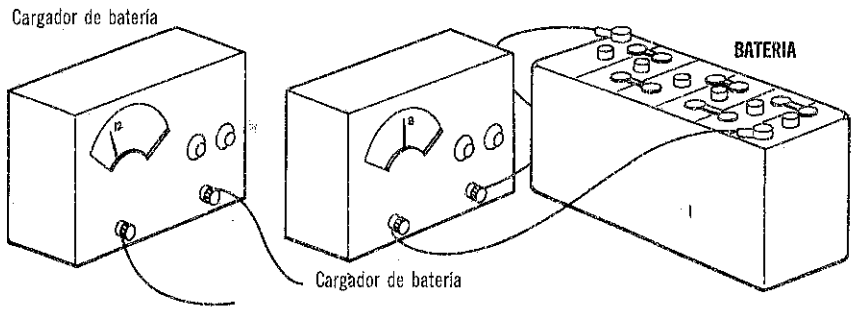
Una falla común en circuitos de c-c es la que ocurre en la fuente de energía. Las fuentes pueden fallar de forma que pierdan totalmente su salida, o de manera que su tensión de salida disminuya a un valor inferior al que se considere normal.

En materia de electricidad, las dos fuentes de energía más comunes en c-c son el generador de c-c y la batería. Los generadores de c-c pueden fallar debido a algún defecto mecánico dentro del generador o debido a dificultades eléctricas de construcción, por ejemplo, conductores abiertos o en corto.

El tipo más común de falla de una batería es una disminución en la tensión de salida, causada por la descarga de la batería. Toda batería se descarga gradualmente al salir corriente de ella durante cierto tiempo. Cuando es ha descargado hasta el punto en que su tensión de salida es inferior a la necesaria para que el circuito opere, deberá cargarse o bien substituirse. Las baterías también pueden sufrir corto circuitos internos y en este caso deben substituirse. Sin embargo, esto no sucede con frecuencia. Los generadores de c-c y las baterías se describen detalladamente en el volumen 6.

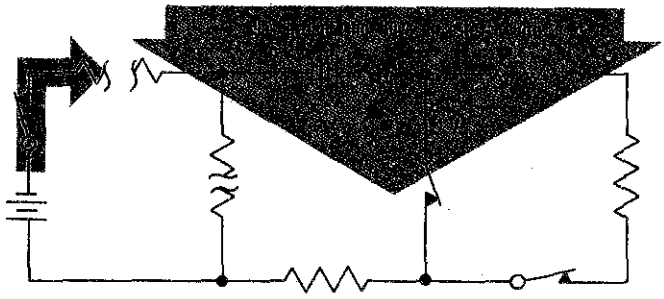


Los generadores de c-c y baterías fallan ya sea por pérdida de sus salidas completamente o porque sus tensiones de salida disminuyen considerablemente.



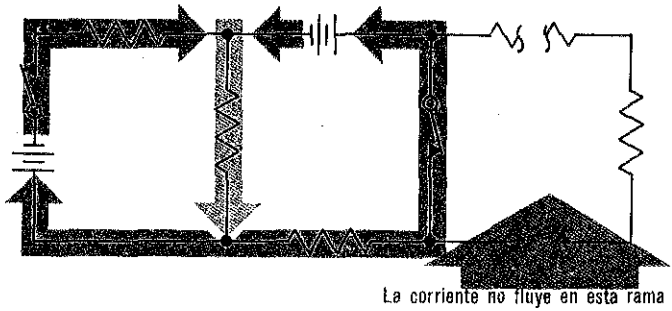
fallas en los circuitos de c-c

Para que un circuito opere correctamente, *cada una de sus partes* debe funcionar en la forma prevista. La *fuente de energía* tiene que suministrar la tensión requerida; los *conectores* deben constituir conexiones de baja resistencia entre las partes del circuito sin sobrecalentamiento ni corto circuitos y las *cargas* deben funcionar sin tomar demasiada corriente de la fuente. Los dispositivos auxiliares, son interruptores, por ejemplo, también deben operar correctamente. Puede concluirse pues, que si cualquier parte *falla* o bien opera mal, todo el circuito falla, ya que no puede operar en la forma para la que ha sido diseñado.



Cuando se abre una parte eléctrica, esto no significa necesariamente que el circuito esté abierto. Igualmente, cuando una parte está en corto, no siempre significa que el corto es en todo el circuito

El efecto exacto que una parte con falla tiene sobre un circuito depende de cuál es esa parte y cómo falla, así como el tipo de circuito y la localización de esa parte en el circuito

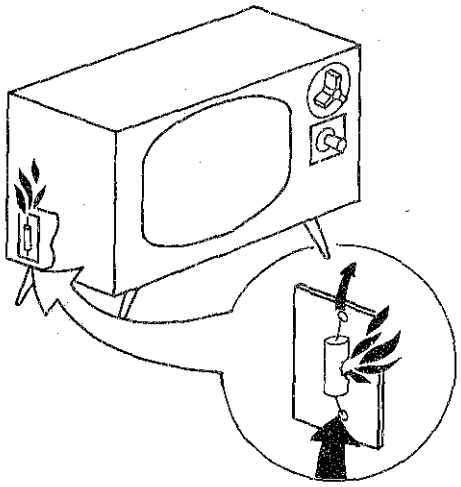


La corriente no fluye en esta rama del circuito

Cuando falla una parte, la manera como afecta al circuito depende del tipo de parte de que se trate, de la forma en que falle, del tipo de circuito en que se use y del lugar en que esté conectada al circuito. Por lo tanto, el mismo tipo de parte, fallando en la misma forma, puede causar efectos diferentes en circuitos diferentes. Por ejemplo, si un resistor se abre en un circuito en serie, abriría a todo el circuito, pero si el mismo resistor se abriera en una rama de un circuito paralelo, sólo abriría esa rama. La corriente total del circuito seguiría fluyendo, aunque disminuida.

fallas en resistores

Los resistores son una de las causas más comunes de falla en un circuito. Esto no se debe a que sean excepcionalmente delicados o que tiendan a sufrir daños, sino más bien a causa de que se usan mucho. En los circuitos eléctricos, los resistores fallan de dos maneras principalmente: 1) se queman y se *abren,* y 2) su valor de resistencia *cambia.* Los resistores pueden variar de valor en tal forma que su resistencia aumente o disminuya. Si el valor aumenta mucho, actuará como un resistor abierto. Si el valor disminuye mucho, actuará como un resistor en corto. Generalmente, estas fallas son el resultado de *calor* generado por la corriente en el resistor. Si el calor no es intenso, pero se genera durante un largo período, el valor del resistor puede cambiar; en tanto que si el calor es muy intenso, el resistor probablemente se quemará en poco tiempo. Con frecuencia, la falla de un resistor es causada por alguna *otra falla* en el circuito, que resulta en un aumento en la corriente del circuito, entonces el aumento de corriente hace que el resistor se sobrecaliente y, en consecuencia, falle.



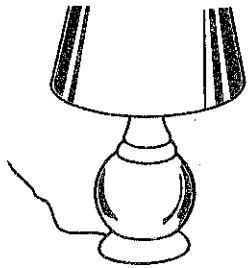
La mayor parte de las fallas en resistores resultan del calor generado en el resistor por el flujo de la corriente. Este calor puede causar cambios en el valor de los resistores así como que se quemen y abran.

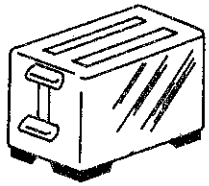
Puesto que la mayor parte de las fallas en resistores son a causa de un exceso de calor, un resistor defectuoso con frecuencia se puede detectar por su aspecto dañado o decolorado. Esto es especialmente cierto para resistores de composición.

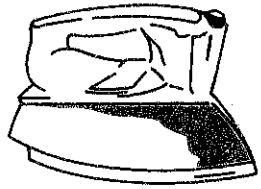
Los resistores ajustables y variables están sujetos a los mismos problemas que los resistores fijos; pero, además, pueden fallar al perder su capacidad para ser ajustados o variados. Esto puede ocurrir a causa de algún defecto mecánico; por ejemplo, un cursor deslizante roto o debido a una dificultad eléctrica, por ejemplo, un contacto sucio.

falla en otras cargas

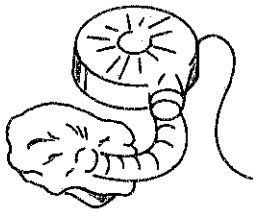
Los resistores no son el único tipo de carga que puede fallar en un circuito. En realidad, cualquier dispositivo usado como carga puede tener problemas y causar la falla en un circuito. Las cargas que usan algún tipo de *elemento calefactor* para efectuar su función frecuentemente constituyen una causa de falla. Los ejemplos de este tipo de carga son: tostadores, lanchas, calentadores eléctricos y lámparas. Durante su operación normal estas cargas sufren calentamiento intenso, el cual causa que el material del elemento se *dilate*. Cuando se corta la corriente el elemento se enfría y se contrae hasta su tamaño original. La cantidad de dilatación y contracción no es grande, pero ocurre cada vez que se hace funcionar al dispositivo. Esta expansión y contracción alternadas *fatiga* al material y, a la larga, el elemento se *rompe* abriendo el circuito.

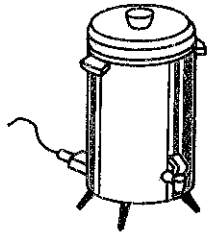






Las cargas que usan un elemento calefactor, generalmente fallan debido al calentamiento y enfriamiento alternados del elemento al ser conectado y dseconectado el circuito. El calentamiento y el enfriamiento causan dilatación y contracción del material del elemento y eventualmente el elemento se rompe.

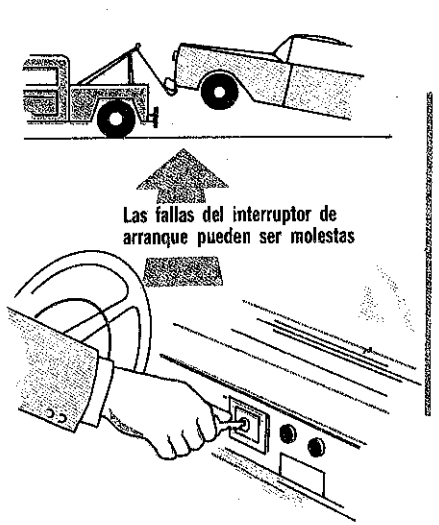




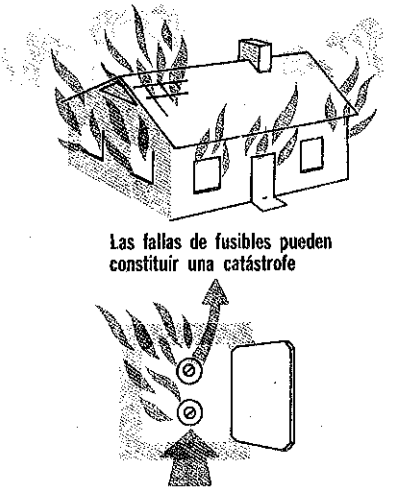
falla en dispositivos auxiliares

Los dos dispositivos auxiliares de circuitos con que el lector se ha familiariazdo son el *interruptor* y el *fusible*. Ambos pueden fallar y afectar la operación de un circuito.

Puesto que el objeto de un interruptor es abrir y cerrar un circuito, cualquier interruptor debe tener dos posiciones: una de ellas que permita el paso de la corriente y otra que no lo permita. El interruptor es operado mecánicamente hacia una u otra posición. Si el interruptor se *pega* en una posición o se *rompe*, de manera que quede fijo en una posición, se pierde su acción básica de interrupción. Entonces, siempre mantendrá cerrado al circuito o bien, abierto en todo momento. Otro tipo de falla en un interruptor ocurre cuando los *contactos* del interruptor se ensucian. Téngase presente que un interruptor no debe tener efecto en un circuito cuando está cerrado. Por lo tanto, su resistencia debe ser casi nula. Pero si los contactos están sucios, la suciedad puede actuar como una *resistencia adicional* en el circuito y causar una disminución en la corriente del circuito.



Las fallas del interruptor de arranque pueden ser molestas



Las fallas de fusibles pueden constituir una catástrofe

Los fusibles no fallan con gran frecuencia; pero cuando lo hacen los resultados pueden ser catastróficos. Si, debido a imperfecciones en el material del fusible, éste se quema a un nivel de corriente *inferior* al normal, el circuito se abrirá *innecesariamente*. Esto es inconveniente, pero no grave. En cambio, si un fusible no se quema cuando debiera, en el circuito fluirán las altas corrientes dañinas que se supone debe evitar. Estas corrientes pueden quemar la fuente de energía o la carga y, hasta causar un incendio.

resumen

☐ La ley de Kirchhoff de tensión es a saber: la suma de las caídas de tensión en cualquier malla cerrada es igual a la suma algebraica de las frecuencias electromotrices en esa malla. Matemáticamente, $\Sigma E_{\text{FUENTE}} = \Sigma IR$. ☐ La ley de Kirchhoff de corriente es: la corriente que llega a cualquier punto en un circuito, es igual a la corriente que sale de él. Matemáticamente, $\Sigma I_{\text{ENT}} = \Sigma I_{\text{SAL}}$.

☐ Al aplicar la ley de Kirchhoff de tensión, se supone una dirección arbitraria para la corriente en la malla y se recorre la malla en la dirección de la corriente supuesta, regresando al punto inicial. ☐ Las frecuencias electromotrices del circuito son positivas si tienden a facilitar la corriente en la dirección supuesta, y negativas si tienden a oponerse. ☐ Si el valor de la corriente determinado mediante las leyes de Kirchhoff es negativo, la dirección de la corriente era en sentido contrario a la supuesta.

☐ El principio de superposición se usa para resolver la corriente cuando existe más de una fuente de energía. La corriente en determinada carga se encuentra sumando las corrientes debidas a cada fuente. La corriente producida por cada fuente se calcula substituyendo a las otras fuentes por su resistencia interna o por un corto circuito si la resistencia interna es despreciable. ☐ Las fuentes de energía fallan por pérdida o disminución de la tensión de salida. ☐ Los resistores pueden fallar por quemarse y abrirse, o por cambiar de valor. ☐ Los conductores pueden fallar por rotura. ☐ Los interruptores pueden fallar por atorarse en una posición o por tener contactos sucios. ☐ Los fusibles pueden fallar por abrirse prematuramente o por no hacerlo.

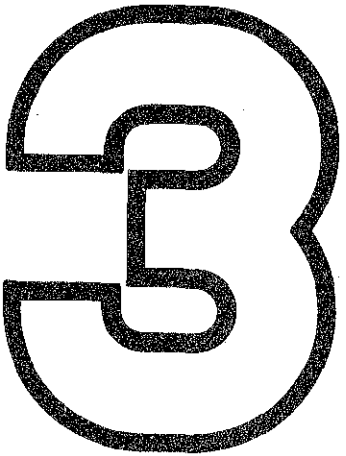
preguntas de repaso

Para las preguntas 1 a 5, *considere el circuito de la página 2-119.*

1. Determine la cantidad de corriente mediante el principio de superposición.
2. ¿Cuál extremo del resistor de 20 ohms es negativo?
3. ¿Cuál es la caída de tensión en cada resistor?
4. ¿Cuál es la potencia total que suministran las dos baterías?
5. Responda a las preguntas 1 a 3 considerando las terminales de la batería de 75 volts estén invertidas.

Para las preguntas 6 a 10, *considere el circuito de la página 2-116.*

6. Determine la cantidad de corriente mediante la ley de Kirchhoff de tensión.
7. ¿Cuál es la polaridad de la caída de tensión en el resistor?
8. ¿Cuál es el valor de la caída de tensión en el resistor?
9. ¿Cuál es la potencia consumida por el resistor?
10. ¿Responder las preguntas 6 a 9 con las terminales de la batería de 20 volts invertidas.

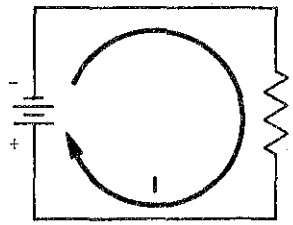


Corriente alterna — Formas de onda de C. A. — Características de C. A. — Circuitos resistivos de C. A. — Circuitos no resistivos de C. A. — Efectos del electromagnetismo — Inductancia — Circuitos inductivos de C. C. — Circuitos inductivos de C. A. — Inductancia mutua — Transformadores — Tipos de transformadores — Pérdidas en transformadores — Circuitos RL — Capacitancia y capacitores — Circuitos capacitivos de C. C. — Circuitos capacitivos de C. A. — Circuitos capacitivos de C. C. fluctuante — Factor de potencia — Tipos de capacitores — Código de color para capacitores — Circuitos R. C.

¿qué es corriente alterna?

En el volumen 1 se describió a la corriente como el movimiento de electrones libres a lo largo de un conductor conectado a un circuito en el que hay una diferencia de potencial. La corriente fluye en tanto exista una diferencia de potencial. Si la polaridad de la diferencia de potencial no varía, la corriente siempre fluirá en una dirección y se llama *corriente directa* o *continua*, o simplemente c-c. La corriente continua y los circuitos de c-c se han descrito detalladamente en el volumen 2.

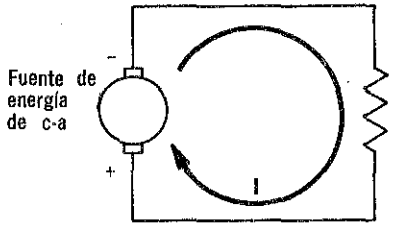
Existe un tipo de corriente eléctrica que *no* siempre fluye en la misma dirección, sino que alterna y fluye primero hacia una dirección y luego se invierte y fluye hacia la otra. A este tipo de corriente se le llama *corriente alterna* o c-a.



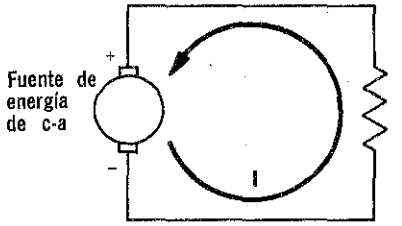
CIRCUITO DE C-C

A diferencia de la corriente continua que siempre fluye en la misma dirección la corriente alterna periódicamente cambia su dirección

La corriente alterna (c-a) fluye en una dirección; luego . . .

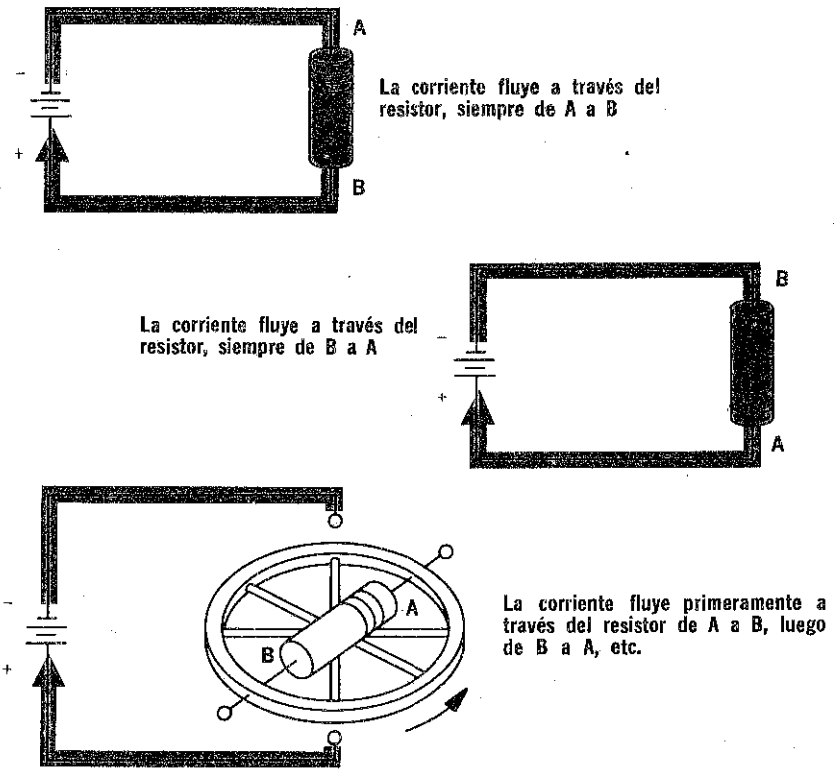


Se invierte y fluye en la otra dirección



CIRCUITO DE C-A

En todo circuito la corriente fluye de la terminal negativa de la fuente hacia la terminal positiva, por tanto es obvio que para haber flujo de corriente alterna la polaridad de la fuente debe alternar o cambiar de dirección. Las fuentes que pueden hacer esto se llaman *fuentes de potencia de c-a*. Los circuitos alimentados por fuentes de energía de c-a y que, por lo tanto, tienen corriente alterna, se llaman *circuitos de c-a*. En forma similar, la potencia consumida en un circuito de c-a es *potencia de c-a*.



El calor se desarrolla en este resistor independientemente de la dirección en que fluya la corriente. La corriente alterna, por lo tanto, tiene el mismo efecto sobre el resistor, que la corriente directa

¿es útil la corriente alterna?

Cuando se inicia el estudio de la corriente alterna, cabe preguntarse si tiene alguna aplicación *práctica*. Puesto que invierte su dirección, pudiera parecer que cuanto hiciera al fluir en una dirección, lo desharía al invertirse y fluir en la dirección opuesta. Sin embargo, esto no sucede.

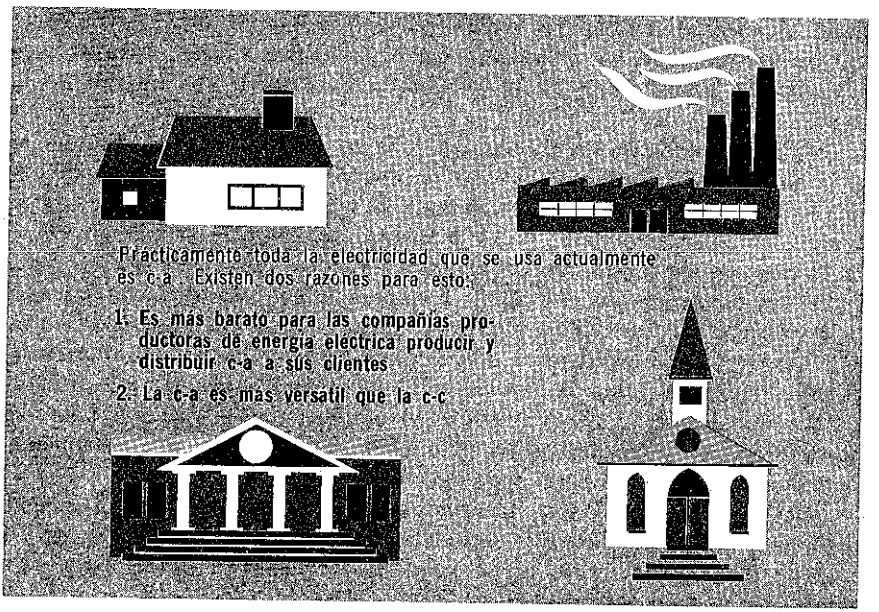
En un circuito, los electrones mismos no efectúan trabajo útil. Lo que importa es el *efecto* que producen las cargas a través de las cuales fluyen. Este efecto es el mismo, independientemente de la dirección que tenga la corriente. Por ejemplo, cuando fluye corriente a través de una resistencia, *siempre* se produce calor, sin importar que la corriente fluya siempre en una dirección o siempre en la dirección contraria, o bien, por momentos en una dirección y por momentos en la otra.

¿por qué se utiliza la corriente alterna

Las primeras fuentes de energía eléctrica que usaron ampliamente proporcionaban corriente directa. Pero, mientras mejor se conocían las características de la corriente alterna, ésta fue sustituyendo a la corriente directa como la forma de energía más usada en el mundo. Actualmente, de toda la energía que se consume en el mundo, cerca del 90% es de corriente alterna. En Estados Unidos este porcentaje es aún mayor. Es cierto que aun allí hay colonias en las ciudades más antiguas en donde todavía se usa energía eléctrica de c-c; sin embargo, también en estas colonias se está cambiando gradualmente a c-a.

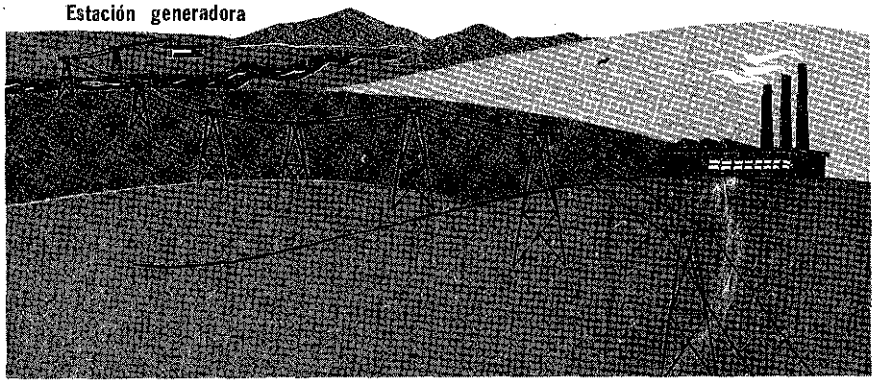
¿Cuáles son las razones de este cambio? ¿Por qué es nueve veces mayor el consumo de energía de c-a que de c-c? Básicamente, hay dos razones para esto. Una de ellas es que, por lo general, la c-a sirve para las mismas aplicaciones que la c-c y, además, es más fácil y barato transmitir c-a desde el punto donde se produce hasta el punto donde se consumirá. La segunda razón para el amplio uso de la c-a es que con ella se pueden hacer ciertas cosas y sirve para ciertas aplicaciones en las cuales la c-c no es adecuada.

No debe pensarse que se dejará de usar la c-c y que toda la electricidad utilizada será de c-a. Hay muchas aplicaciones en donde sólo la c-c puede efectuar la función deseada, especialmente en el interior de equipo eléctrico.



Las estaciones o plantas generadoras no se pueden construir cerca de cada hogar, fábrica o granja, generalmente, deben localizarse cerca de las fuentes disponibles de energía natural, por ejemplo, grandes ríos

La potencia eléctrica que producen las plantas generadoras será enviada a través de largas distancias, a los usuarios. Las pérdidas de potencia son grandes si se envía c-c a largas distancias. En el caso de c-a, estas pérdidas se reducen grandemente



transmisión de potencia eléctrica

En un circuito eléctrico ideal, toda la energía producida por la fuente, la carga la convertirá en alguna forma *útil*, por ejemplo luz o calor. Sin embargo, en la práctica, es imposible construir un circuito ideal. Parte de la energía que procede de la fuente se consume en los conductores de interconexión del circuito y parte se consume dentro de la misma fuente de potencia. Este consumo de energía fuera de la carga es *energía desperdiciada* o *potencia desperdiciada*, por lo que su valor debe mantenerse al mínimo posible. La mayor parte de estas *pérdidas* de potencia son en forma de *calor* generado cuando la corriente del circuito fluye a través de la resistencia en el alambrado y la resistencia interna de la fuente.

Según lo estudiado en el volumen 2, se recordará que estas resistencias generalmente son muy bajas y que, en consecuencia, las pérdidas de potencia serán muy pequeñas. No obstante, u na excepción importante a esto ocurre cuando el alambrado entre la fuente y la carga es *muy largo*, como en el caso de la transmisión de potencia eléctrica desde las estaciones generadoras hasta los usuarios. Estas líneas de fuerza eléctrica con las que el lector seguramente está familiarizado, pueden tener longitudes de cientos de kilómetros. Aun un alambre de cobre de gran diámetro, cuya resistencia es muy baja, tiene una resistencia total considerable cuando se trata de cientos de kilómetros. Podría usarse el alambre de plata, que tiene la resistencia más baja de todas, pero esto no reduciría sustancialmente la resistencia total y su costo sería excesivo.

¿Cómo pueden entonces, transmitirse grandes cantidades de potencia eléctrica a través de grandes distancias sin grandes pérdidas en las líneas de transmisión? Esto no se puede hacer con c-c. Sin embargo, es relativamente fácil lograrlo con c-a.

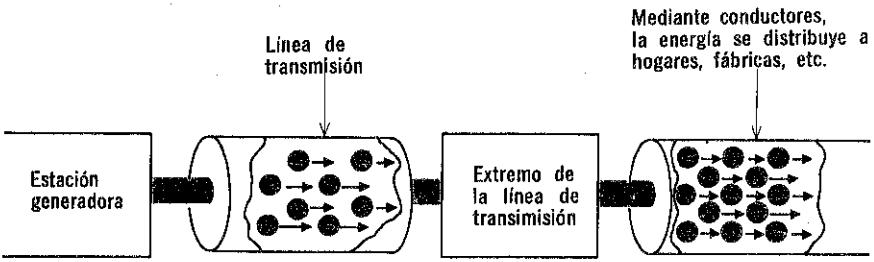
pérdidas de potencia por transmisión

Al transmitirse energía eléctrica, una parte de ésta se convierte en calor a lo largo de la línea de transmisión. De lo estudiado en el volumen 2 se recordará que esta pérdida en forma de calor es *directamente proporcional* a la resistencia y al *cuadrado* de la corriente. Esto se puede apreciar en la siguiente fórmula para *pérdida de potencia:*

$$P = I^2R$$

Así, las pérdidas en forma de calor o de potencia (P) se pueden reducir si se baja la corriente (I) que lleve la línea de transmisión o la resistencia (R) del conductor, o bien, ambas. Sin embargo, la resistencia tiene mucho menos efecto en la pérdida de potencia que la coriente, ya que la corriente está elevada al cuadrado.

En la transmisión de potencia de c-a, la corriente que lleva la línea de transmisión es relativamente pequeña



En el extremo de la línea de transmisión, la pequeña corriente que llega se convierte a grandes corrientes requeridas por los usuarios de potencia eléctrica. Esto se hace así para que las pérdidas I^2R (potencia) sean bajas en las líneas de transmisión

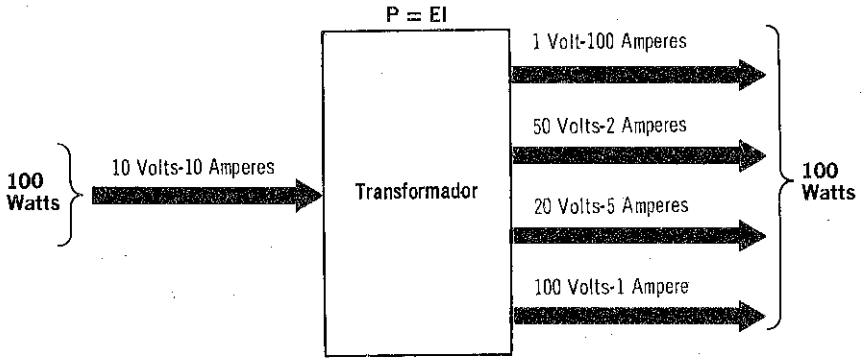
Si se duplicara la resistencia, las pérdidas de potencia serían el doble, pero si se duplica la corriente, las pérdidas de potencia se cuadruplican. Así que la mejor manera de reducir las pérdidas de potencias es *reducir* la *corriente.* Sin embargo, los usuarios de energía eléctrica necesitan tener, grandes corrientes al final de la línea de transmisión. Por lo tanto, lo más conveniente es un método por el cual se transmitan bajas corrientes por las líneas de transmisión, pero se pueden obtener altas corrientes al final de la línea. Esto es posible con potencia producida por c-a. En las líneas se envían corrientes relativamente bajas y, cuando llegan al punto donde debe consumirse, se convierten en corrientes elevadas.

transmisión de potencia de c-a

Tal vez parezca raro que se pueda transmitir potencia eléctrica con *baja corriente* en la línea de transmisión y, en cambio, obtener potencia con *alta corriente* al final de la línea. Para comprender esto debe tenerse presente la relación que hay entre potencia eléctrica, tensión y corriente, según la siguiente ecuación:

$$P = EI$$

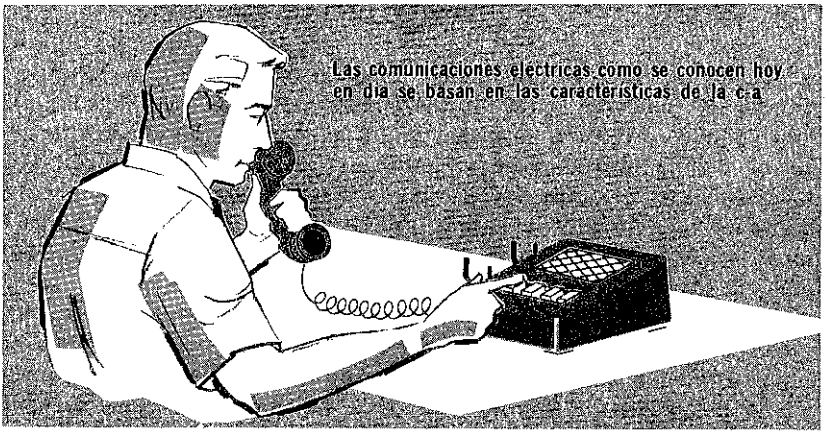
Se concluye de esta ecuación que puede producirse la *misma* potencia eléctrica (P) con *muchas combinaciones* de corriente (I) y tensión (E). Por ejemplo, puede obtenerse una potencia de 1,000 watts con una tensión de 100 volts y una corriente de 10 amperes, o con una tensión de 200 volts, y una corriente de 5 amperes, o bien, con una tensión de 1,000 volts y una corriente de un ampere.

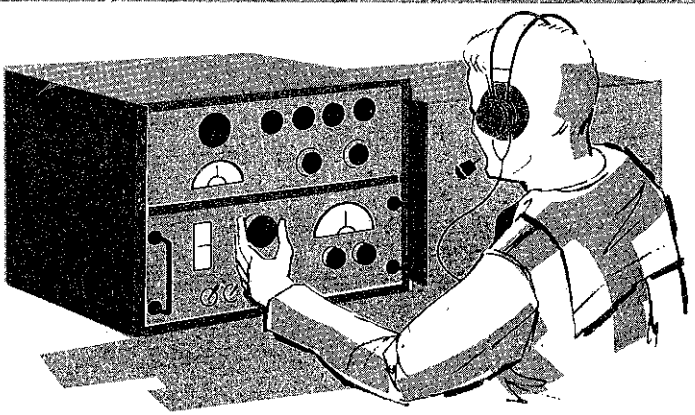


La potencia en c-a se puede convertir a varias combinaciones de voltaje y corriente. El valor de la potencia después de la conversión es el mismo que su valor antes de la conversión, considerándose la relación P = EI

Por lo tanto, hay muchas maneras de obtener una potencia de un millón de watts en una línea de transmisión; por ejemplo, puede obtenerse con una tensión de 1,000 volts y, en este caso, la corriente sería de 1,000 amperes y muy grandes las pérdidas de potencia en la línea. También puede obtenerse esa misma potencia con una tensión de 100,000 volts y una corriente de sólo 10 amperes y las pérdidas de potencia serían mucho menores. Al final de la línea de transmisión, la combinación de tensión y corriente se puede convertir a cualquier otra combinación de tensión y corriente que produzca un total de un millón de watts.

Los dispositivos que se utilizan para convertir potencia de c-a de una combinación de valores de tensión y corriente a otra se llaman *transformadores* y se estudiarán más adelante en este mismo volumen.





otras características de la c-a

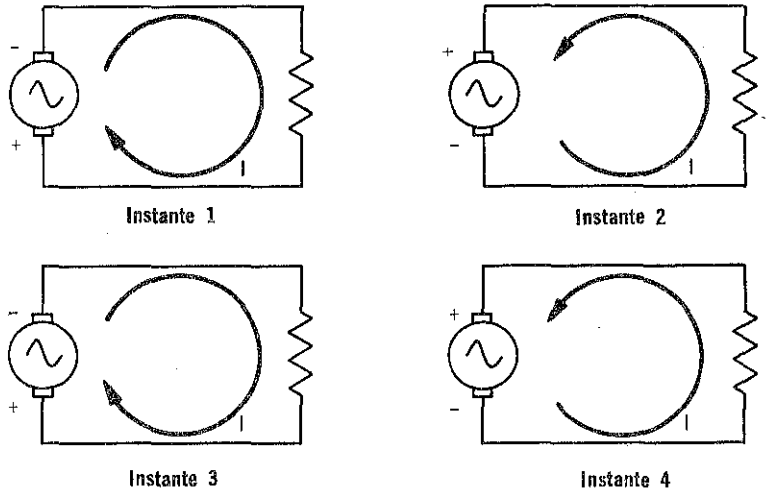
El hecho de que pueda transmistirse a través de largas líneas de transmisión en forma barata y fácil, no constituye la única ventaja que tiene la c-a sobre la c-c. La c-a tiene otras características con que no cuenta la c-c y que la hacen muy adecuada para ciertos usos. Una de estas características es el hecho de que *varía* en valor o magnitud. No se eleva inmediatamente a un valor máximo ni permanece en ese valor hasta que el circuito se abre, como ocurre con la c-c. Este cambio de nivel es similar a la forma en que cambia el nivel de las ondas sonoras en el aire. Así pues, en el campo de las comunicaciones eléctricas, se usa c-a para reproducir y transmitir sonidos eléctricamente.

Otra característica importante de la c-a, es el hecho de que la energía eléctrica *radia* desde cualquier circuito donde fluya corriente eléctrica. Esta característica constituye la base de las comunicaciones de radio y se usa mucho en el campo de la electrónica.

la fuente de energía de c-a

El objeto de cualquier fuente de potencia es producir una *tensión* o diferencia de potencial entre sus terminales de salida y mantener esta tensión cuando el circuito se cierra y fluye *corriente*. En fuentes de potencia de c-c, la polaridad de la tensión de salida *nunca* cambia. Una terminal es *siempre negativa* y la otra es *siempre positiva*. Por lo tanto, la corriente del circuito siempre tiene la misma dirección; sale de la terminal negativa de la fuente y regresa al polo positivo de la misma, después de haber pasado por la carga. Por otra parte, las fuentes de c-a *cambian de polaridad constantemente*. En determinado momento, una terminal es negativa y la otra positiva. Un instante más tarde, la terminal negativa se vuelve positiva y la positiva se vuelve negativa. Estas inversiones de polaridad son continuas y cada vez que suceden, la corriente del circuito cambia de dirección, ya que debe fluir siempre de la terminal negativa hacia la positiva.

Las fuentes de energía de c-a se llaman *generadores de c-a* o *alternadores*.

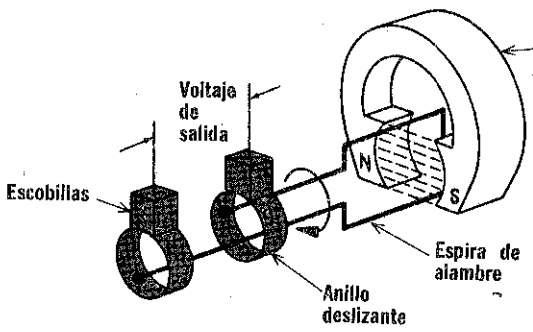


La polaridad de las fuentes de potencia en c-a cambia continuamente. Cada vez que se invierte la polaridad, la corriente del circuito cambia también de dirección

un generador elemental de c-a

Los generadores de c-a combinan el movimiento físico y el magnetismo para producir una tensión de c-a. En el volumen 1 se vio que si se mueve un conductor a través de un camp magnético, de tal manera que atraviese las líneas de flujo se ejerce una fuerza sobre los electrones libres y los hace moverse. Puesto que dicha fuerza produce flujo de corriente, puede considerarse como una fem o como una tensión. Este es el principio básico según el cual funcionan los generadores de c-a.

El tipo más sencillo de generador c-a se ilustra en la figura. Consta de una sola *espira* de alambre que se coloca entre los polos de un imán permanente y se le hace *girar*. Al hacerlo, atraviesa las líneas de fuerza magnéticas; entonces se dice que las *corta* y se origina una tensión. En la práctica, la espira realmente está formada por una serie de espiras dentro de un *rotor* o una *armadura*.



Al girar la bobina de un generador de c-a, se genera un voltaje que aparece en los extremos de la bobina. Este voltaje se transfiere a un circuito externo por medio de anillos deslizantes y escobillas

La tensión se origina entre los dos extremos de la espira y se usan *anillos deslizantes* y *carbones* para aplicar la tensión a un circuito externo. Los anillos deslizantes están pulidos y hechos de material conductor. Se conecta un anillo a cada uno de los extremos de la espira y ambos anillos giran al mismo tiempo que la espira. Así la tensión de salida del generador se produce entre los dos anillos deslizantes. Las escobillas o carbones están en contacto con los anillos deslizantes, una con cada uno de ellos. Los carbones no se mueven sino que permanecen en contacto con los anillos deslizantes y frotan su superficie al girar éstos. De esta manera, la tensión de salida del generador ocurre entre los carbones y se puede aplicar fácilmente a un circuito. Se puede apreciar, de acuerdo con la descripción, que debe contarse con algo que haga girar la espira para que el generador funcione. Este "algo", puede ser agua corriente, un motor de gasolina, vapor originado por combustión de carbón o aun vapor producido por un reactor nuclear.

En el volumen 6 se estudian en detalle los generadores de c-a.

resumen

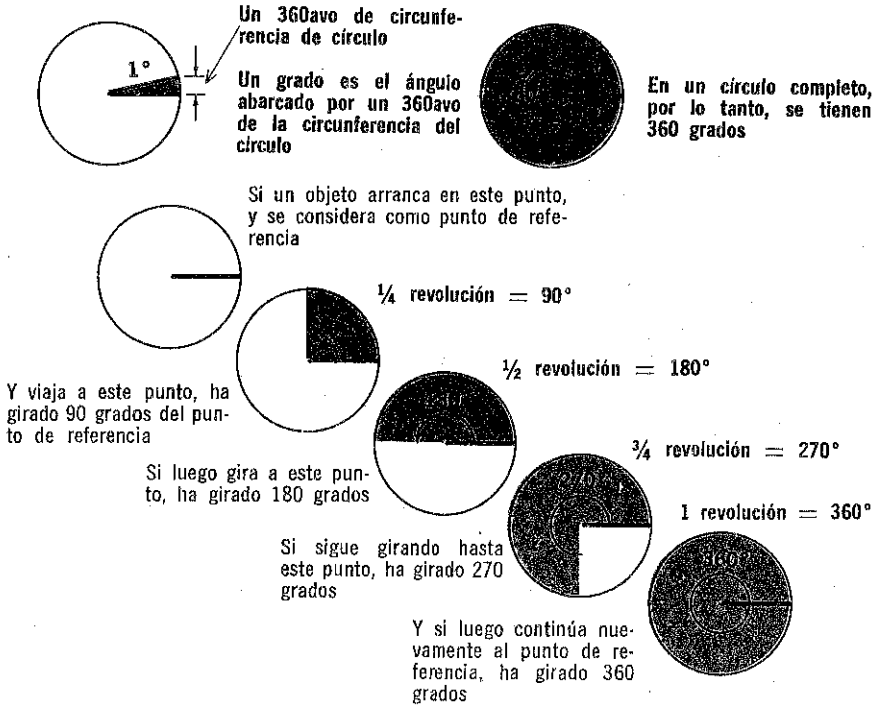
☐ La corriente alterna fluye primeramente en una dirección y luego se invierte y fluye en la otra. ☐ Las fuentes de potencia de c-a producen el flujo de corriente alterna. ☐ Los circuitos alimentados por fuentes de potencia de c-a se llaman circuitos de c-a y la potencia que consumen es potencia de c-a. ☐ El noventa por ciento de toda la potencia eléctrica consumida en el mundo es producida por c-a.

☐ Existen dos razones básicas por las que se emplea c-a: Se puede transmitir más fácilmente y a menor costo que la c-c; además con ello se pueden hacer ciertas cosas y sirve para ciertas aplicaciones para las que no es adecuada la c-c. ☐ El calor generado en las líneas de transmisión es potencia desperdiciada. ☐ La transmisión de potencia de c-a con un valor relativamente bajo de corriente, mantiene las pérdidas de potencia al mínimo. ☐ Se puede producir el mismo nivel de potencia con muchas combinaciones de tensión y corriente.

☐ Cualquier circuito donde fluya corriente alterna radía energía eléctrica. Esta es la base de las radiocomunicaciones. ☐ Las fuentes de potencia de c-a se llaman generadores de c-a o alternadores. ☐ El tipo más sencillo de generador de c-a consta de una sola espira de alambre colocada entre los polos de un imán y a la cual se le hace girar. El corte de las líneas de fuerza magnéticas origina una tensión. ☐ Una serie de espiras rotatorias recibe el nombre de rotor o armadura. ☐ Los anillos deslizantes y los carbones se usan para aplicar la tensión de salida de un generador a un circuito externo.

preguntas de repaso

1. ¿Qué es *corriente alterna*? ¿Qué es *corriente continua*?
2. ¿Se emplea aún energía eléctrica de c-c?
3. ¿Qué significa *pérdida de potencia*?
4. ¿Cómo pueden mantenerse al mínimo las pérdidas de potencia?
5. ¿Cuál es el efecto que tiene en las pérdidas de potencia el duplicar la resistencia de una línea de transmisión?
6. ¿Cuál es el efecto que tiene en las pérdidas de potencia el duplicar el valor de la corriente en una línea de transmisión?
7. ¿Qué dispositivo sirve para convertir potencia de c-a, de una combinación de tensión y corriente a otra? ¿Por qué se usa?
8. ¿Cómo se les llama a las fuentes de potencia de c-a?
9. ¿Qué son *anillos deslizantes* y *carbones*?
10. ¿Qué produciría mayores pérdidas de potencia: la transmisión de potencia a 100 volts y una corriente de 10 amperes o de 200 volts y 5 amperes?



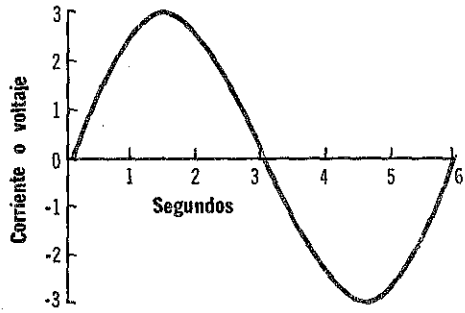
movimiento angular

La espira de alambre en el generador sencillo que se describió en la página 3-9 giraba con el campo magnético. Y, como se sabe, la rotación es movimiento *en círculo*, tal como la rotación de la hélice de un aeroplano. Más tarde se encontrará que con frecuencia es necesario hablar acerca de la tensión que resulta de cada posición de la espira de alambre al girar. Para esto, es preciso comprender lo que significa *movimiento angular* y la forma en que se expresa.

El movimiento angular es un movimiento en círculo y generalmente se describe dividiendo la circunferencia de un círculo en 360 partes iguales. Si de los extremos de cualquiera de estas partes se trazan líneas al centro del círculo, a la distancia entre dichas líneas se le llama *grado*. Puesto que esto se puede hacer en cada una de las 360 longitudes iguales existen 360 *grados* en el *círculo*. Una línea de la circunferencia al centro del círculo se llama *radio*. De manera que la distancia entre dos radios cualesquiera de un círculo se mide en *grados*. Esta distancia se mide siempre en sentido inverso a la rotación de las manecillas del reloj, de un radio al otro. En la práctica, un radio corresponde al cuerpo u objeto que está girando. El otro radio es un *punto de referencia*, a partir del cual se mide la posición del primero.

formas de onda de c-a

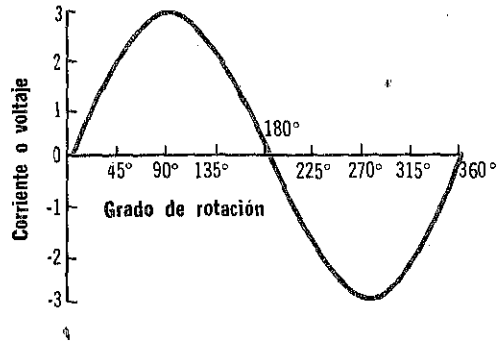
A menudo es muy útil saber cómo *cambian* la corriente y la tensión al transcurrir el tiempo. La forma más fácil de hacer esto consiste en graficar una *forma de onda* en papel milimétrico, con lo cual se obtiene una representación gráfica de la corriente y la tensión. Una forma de onda muestra la *magnitud* y *dirección* de la corriente o la tensión en cualquier instante. Para graficar una forma de onda, se definen los dos ejes como se ilustra en la figura. Un eje, generalmente el vertical, es el *de corriente* o *de tensión* y se grafita con el número adecuado de divisiones de corriente o tensión. Generalmente, el otro eje es el *eje de tiempo,* y se divide en unidades adecuadas de tiempo, por ejemplo, segundos. Con los ejes identificados, se puede graficar la corriente o tensión en cada unidad de tiempo, como un punto en la gráfica. Y cuando todos los puntos se unen con una línea continua, la figura resultante es la forma de onda.



Las formas de onda pueden trazarse ya sea para corriente o voltaje. Estas muestran en qué forma varía la corriente o el voltaje, con respecto al tiempo

A veces, cuando se estudian fuentes de potencia de c-a, se desea conocer cómo varía la tensión de un generador al cambiar la posición de la armadura durante su rotación. En este caso, en lugar de marcar el eje horizontal en unidades de tiempo, se dividiría en *grados de rotación.* Entonces, la forma de onda indicará la magnitud y polaridad de la tensión para cada posición de la armadura.

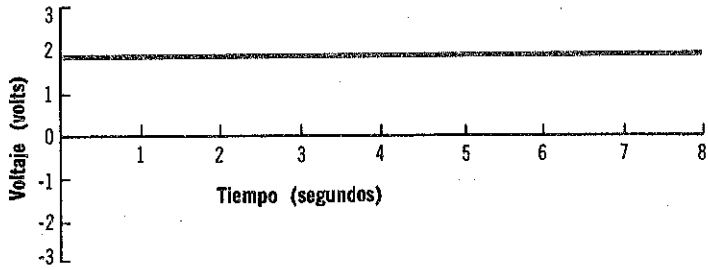
Para fuentes de potencia de c-a, también las formas de onda pueden mostrar cómo varía el voltaje de salida con la posición de la armadura de generador



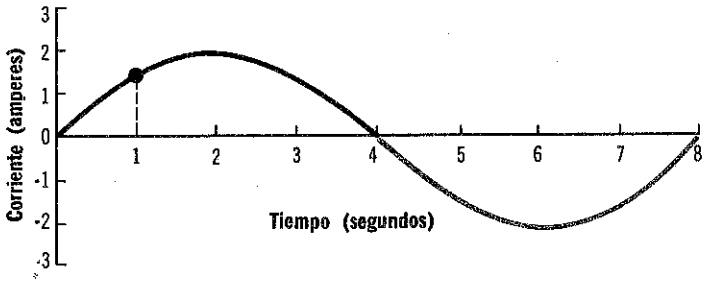
formas de onda de c-a y de c-c

La polaridad y magnitud de una corriente o una tensión continuas nunca cambian. Por lo tanto, la forma de onda de una tensión continua de 2 volts sería una línea recta.

Una corriente o una tensión alternas cambian tanto en magnitud como en polaridad. Esto puede apreciarse por la forma de onda de una corriente alterna. Cuando la onda está arriba de la línea de corriente cero, la corriente fluye en una dirección, a la que se le llama dirección positiva, en este caso. Cuando la onda está abajo de la línea de corriente



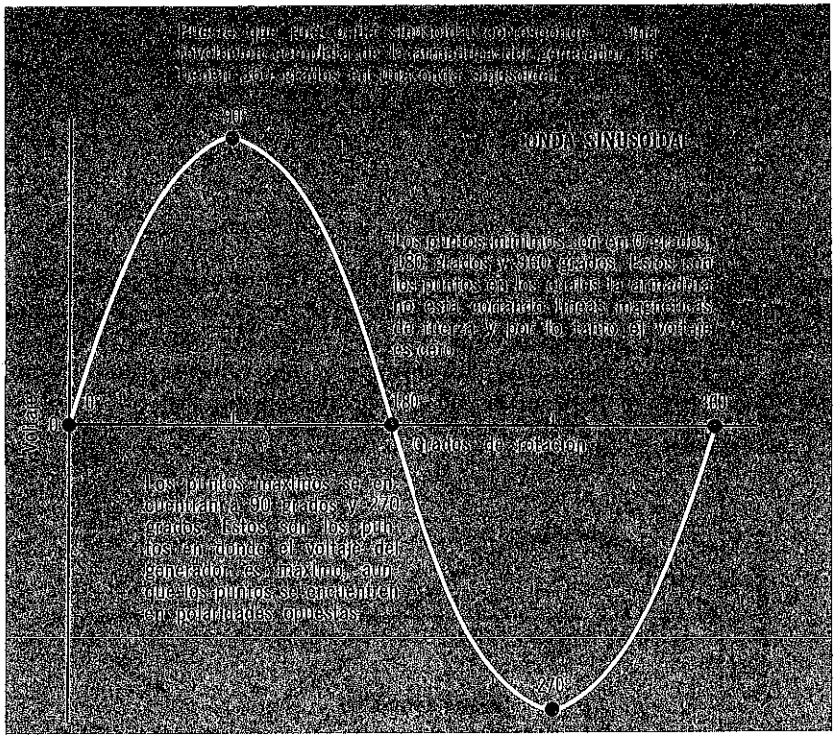
cero, como se muestra en color, la corriente ha invertido su sentido y fluye en la dirección opuesta. Obsérvese que la corriente representada por la onda, fluye primero en una dirección; luego se invierte y fluye en la otra dirección, repitiéndose las inversiones nuevamente; las dos primeras inversiones se realizan en un tiempo de 8 segundos.



La distancia de cualquier punto de la onda al eje de tiempo es la magnitud de la corriente en ese instante. Así, en un segundo, la corriente tiene un valor de 1½ amperes, como lo indica el punto de la onda. En forma similar, a 8 segundos no hay distancia entre la onda y el eje de tiempo, de manera que la corriente es nula.

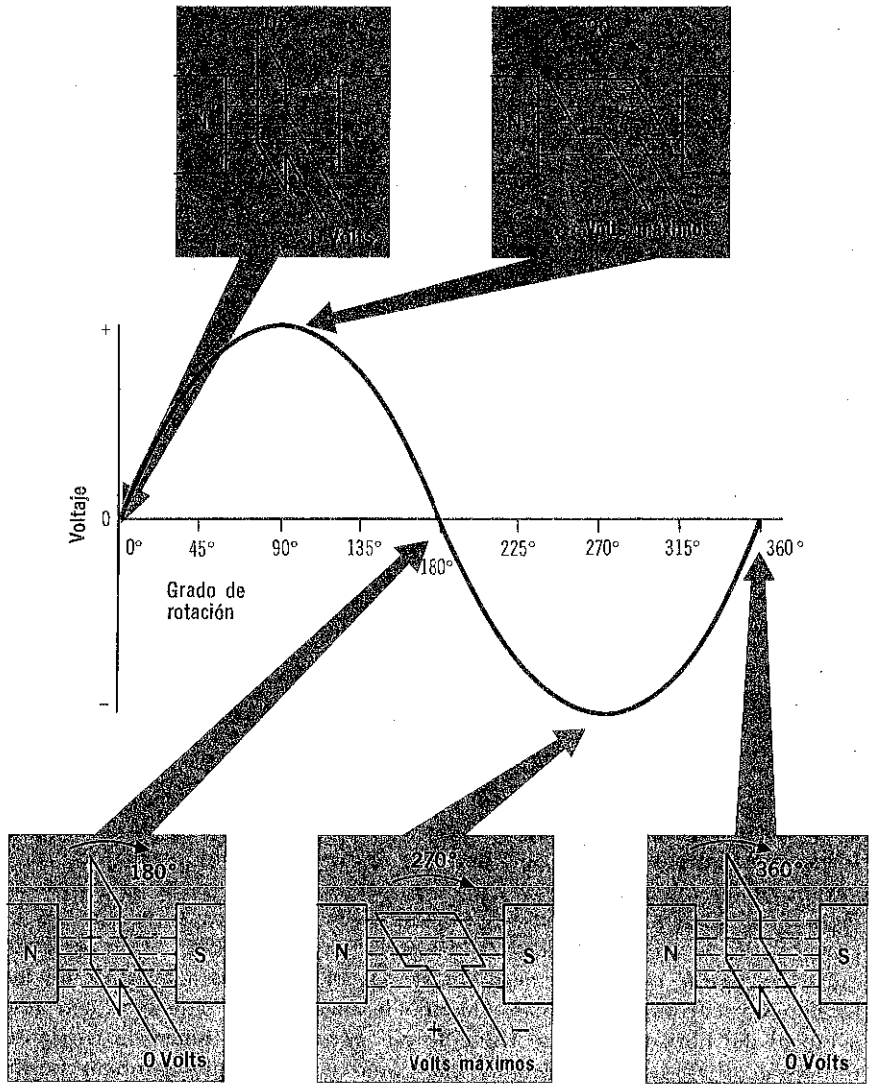
la onda sinusoidal

La tensión producida por el generador simple de c-a descrito anteriormente, tiene una forma de onda característica que es importante en el estudio de toda la teoría de circuitos de c-a. Esta forma de onda representa la tensión de salida del generador durante *una revolución completa* de la armadura. La tensión comienza en *cero* cuando la armadura no corta líneas magnéticas de fuerza. Al girar la armadura, la tensión aumenta desde cero hasta un valor *máximo* en una dirección. Luego disminuye otra vez hasta *cero*. En este punto la tensión cambia de polaridad y aumenta hasta que llega a un *máximo* con esta polaridad opuesta. Luego disminuye nuevamente hasta cero. Entonces, la armadura del generador ha *completado* una *revolución*.



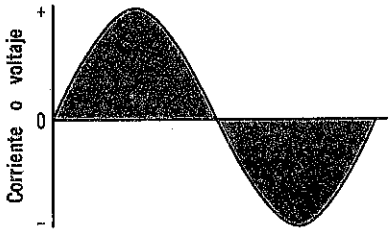
En cada revolución que realice la armadura, la tensión variará en esta misma forma. La onda que representa esta variación de tensión en una revolución completa de la armadura, recibe el nombre de *onda sinusoidal*. Recibe este nombre del hecho de que la tensión generada en cualquier punto del recorrido de la armadura es proporcional al seno del ángulo entre el campo magnético y la dirección de movimiento de la armadura.

cómo se genera una onda sinusoidal

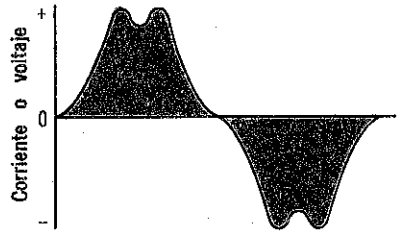


Al girar la armadura de generador, la magnitud de polaridad del voltaje producido sigue la forma de una onda sinusoidal.

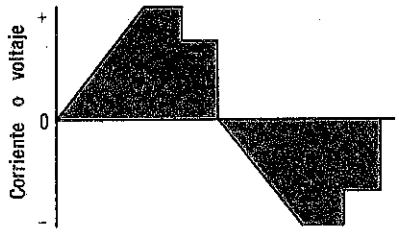
Las ondas de c-a son simétricas con respecto al eje horizontal



Esta es una onda sinusoidal de c-a



Esta es una forma de onda de c-a que varía continuamente en magnitud pero en una forma diferente a una onda sinusoidal



Esta es una forma de onda de c-a que no varía continuamente en magnitud. La magnitud no cambia cuando la forma de onda es una línea recta horizontal

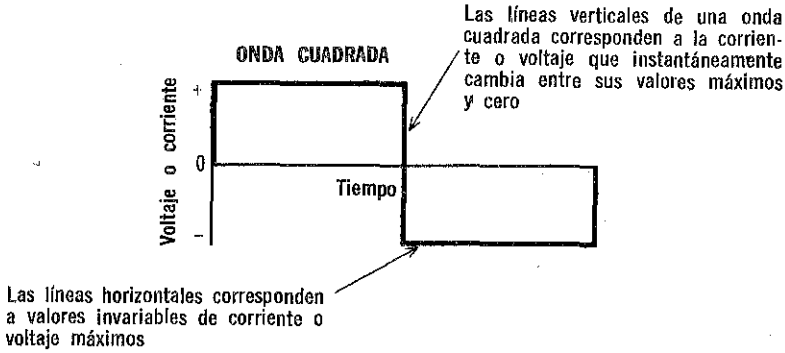
simetría en las formas de onda

Quizás el lector haya notado en la página anterior que la parte de la onda sinusoidal que queda *abajo* del eje horizontal tiene la *misma* forma que la *parte* de arriba del eje, ambas tienen la misma altura y varían de la misma manera. En otras palabras, si la parte negativa de la onda se hiciese girar con respecto al eje y se hiciera coincidir con la parte positiva, ambas mitades de la onda serían idénticas. Esta *simetría* entre las partes positiva y negativa de las ondas es característica de las tensiones y corrientes alternas. Cuando la onda no es simétrica con respecto al eje horizontal no se trata de c-a *pura*. Por lo tanto, la corriente o tensión alternas se pueden definir como aquellas que cambian periódicamente de dirección y que, en ambas direcciones varían exactamente en la misma forma.

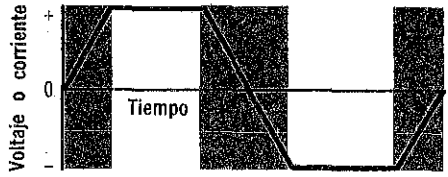
Al trabajar con c-a, el lector conocerá bien otras ondas además de la sinusoidal. Dos de las más comunes, con las cuales habrá de familiarizarse, son la *onda cuadrada* y la *onda diente de sierra*.

ondas cuadradas

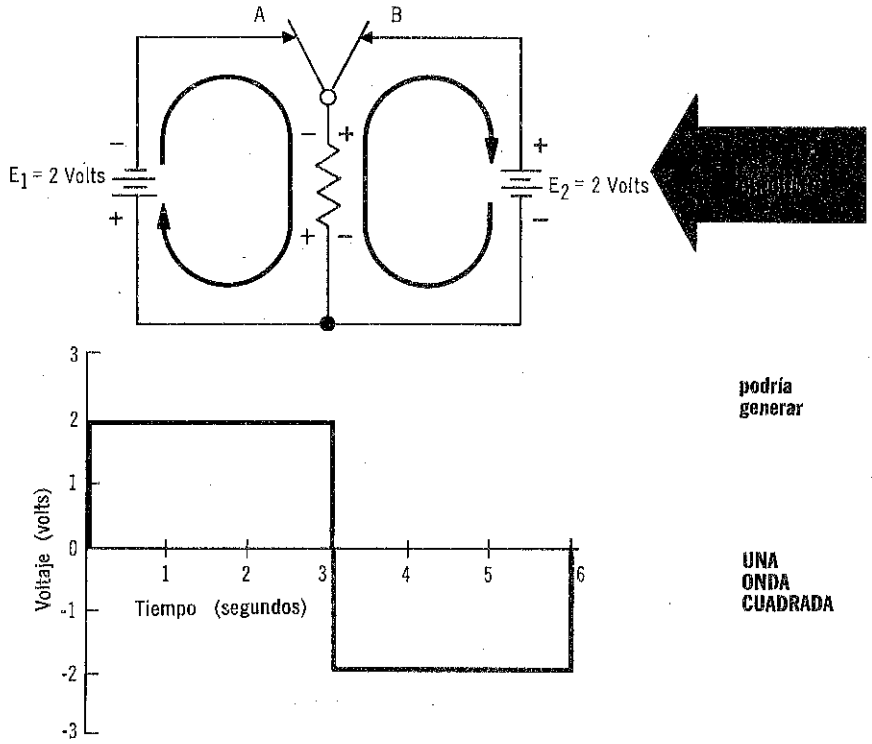
Un tipo muy común de onda en la cual la magnitud de la corriente o la tensión no varía continuamente, se llama *onda cuadrada.* En una onda cuadrada, la corriente o tensión aumenta *instantáneamente* de *cero* a un valor *máximo.* Luego, no varía, sino que *se mantiene* a este valor máximo durante un período, después del cual la corriente o la tensión hacen *instantáneamente* tres cosas: 1) *disminuye* a cero; 2) *invierte* su dirección, y 3) aumenta hasta su valor máximo en esta dirección opuesta. Se mantiene en este valor máximo negativo durante un tiempo y luego *disminuye* instantáneamente a cero. Por lo tanto, la onda está formada de una serie de *líneas rectas,* según se ilustra.



Si una onda cuadrada se extiende grandemente con respecto al eje de tiempo, las líneas verticales aparecerían en realidad como líneas inclinadas debido a que la corriente o el voltaje, no pueden cambiar instantáneamente de valor. Habría necesariamente un lapso definido para los cambios



En realidad, la corriente y la tensión *no* pueden cambiar entre sus valores máximos y cero instantáneamente. Sin embargo, estos cambios se efectúan tan rápidamente que, desde el punto de vista práctico, se pueden considerar instantáneos. Se observará que esto ocurre con mucha frecuencia en el campo de la electricidad. Muchas cosas suceden con tal rapidez que se pueden considerar, y se les llamará *instantáneas,* a pesar de que, estrictamente, no lo sean.



cómo se genera una onda cuadrada

Si un interruptor en el circuito cambia de posición alternativamente entre A y B, la onda de tensión en la resistencia será una onda cuadrada. Por ejemplo, cuando el interruptor está primeramente en la posición A, la corriente fluye de la batería E_1 hacia el resistor e instantáneamente se constituye una caída de 2 volts en el resistor. Esta tensión se mantiene en 2 volts mientras el interruptor se encuentre en A.

Si después de 3 segundos el interruptor cambia a la posición B, la tensión producida por la corriente E_1 en el resistor disminuye hasta cero. Entonces, la corriente de E_2 fluye a través del resistor en dirección opuesta y produce una caída de 2 volts en el resistor. La tensión sigue siendo de 2 volts, pero la polaridad está invertida en relación con la que E_1 produjo anteriormente.

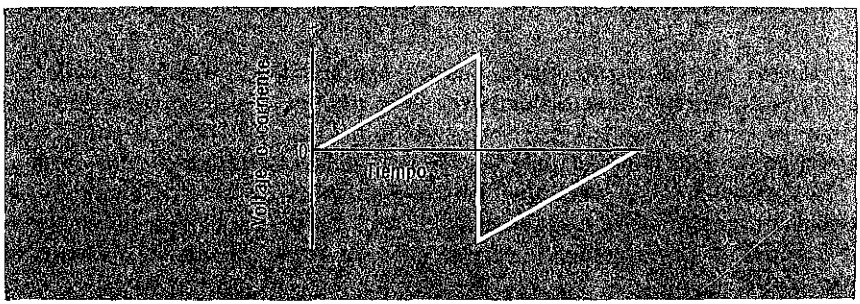
Si después de 3 segundos se quita el interruptor de la posición B, la corriente de E_2 cesa y la tensión en el resistor baja a cero. La tensión en el resistor ha completado así una onda cuadrada completa. Si el interruptor se regresa a la posición A y se repite el proceso, se generará otra onda cuadrada.

ondas diente de sierra

Probablemente se ha notado que las ondas reciben sus nombres, según sus formas. Por lo tanto, una onda cuadrada es cuadrada, o posiblemente rectangular, y una onda sinusoidal tiene la forma de curva que representa la variación de un seno trigonométrico. Existe otra onda muy común y, en cuanto se sepa su nombre, probablemente se tendrá una buena idea de su forma. A ésta se le llama onda *diente de sierra* y se asemeja mucho a los dientes de una sierra común.

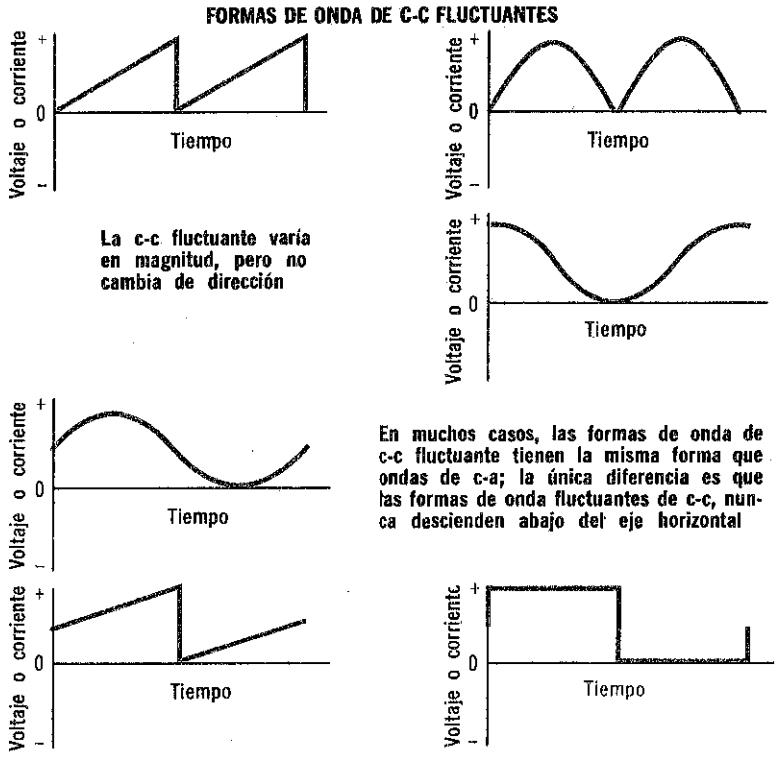
Para comprender cómo se produce una onda "diente de sierra", primero se debe saber lo que es un aumento *lineal* de corriente o tensión. Ya se sabe que un cambio instantáneo en corriente o tensión se representa por medio de una onda, por una *línea recta vertical.* Por ejemplo, las líneas curvas de una onda sinusoidal, indican que la corriente o la tensión cambian en forma *no lineal.* Esto significa que en cada *incremento igual* o unidad de tiempo, la corriente o la tensión cambian en una *cantidad diferente.* Por ejemplo, en el primer segundo, la corriente puede variar de cero a cinco amperes, o aumentar 5 amperes. En el siguiente segundo puede pasar de 5 a 8 amperes; o sea, un aumento de 3 amperes; y en el siguiente segundo puede elevarse a 10 amperes; o sea, aumentar 2 amperes. Por lo tanto, en incrementos iguales, de 1 segundo, la corriente ha tenido aumentos de 5, 3 y 2 amperes. Este es un cambio *no lineal* de corriente. Para cambiar linealmente, la corriente o la tensión deben variar *cantidades iguales* en *intervalos de tiempo iguales.* Esto significa que en el ejemplo anterior hubiera tenido que pasar de cero a 5 amperes en el primer segundo, de 5 a 10 amperes en el segundo siguiente y de 10 a 15 amperes en el tercer segundo. Su aumento lineal sería de 5 amperes por segundo. En una onda, un cambio lineal de la corriente o la tensión se representa con una *recta inclinada.*

La onda diente de sierra comienza en cero y aumenta linealmente a su valor máximo, en una dirección. Luego, instantáneamente desciende a cero, invierte su dirección y aumenta a su valor máximo en esta otra dirección. En el instante en que llega a su valor máximo, comienza a disminuir linealmente, nuevamente a cero.



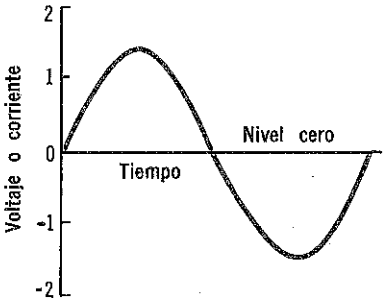
c-c fluctuante

Se sabe que toda corriente tiene una *magnitud* y una *dirección*. En el caso de corriente directa, tanto la magnitud como la dirección son constantes y nunca cambian. En el caso de corriente alterna, ambas cambian, invirtiéndose periódicamente la dirección y variando la magnitud entre cero y algún valor máximo, en ambas direcciones. Existe otro tipo de corriente en la cual la *magnitud varía* pero la *dirección nunca cambia*. A esta corriente se le llama *c-c fluctuante*, en virtud de que se puede considerar como una corriente directa cuyo valor fluctúa o cambia.



Puesto que la c-c fluctuante nunca cambia de dirección, la onda de cualquier corriente directa fluctuante o de tensión, está completamente encima del eje horizontal (cero). Nunca baja del eje o se vuelve negativa. Sin embargo, la forma de la onda puede ser similar a cualquier onda de c-a.

Posteriormente se verá que las características de la c-c fluctuante se asemejan más a las de c-a que a las de c-c. Por eso, este tipo de corriente se estudia en este volumen con la c-a, en lugar de en el volumen 2 con la c-c.



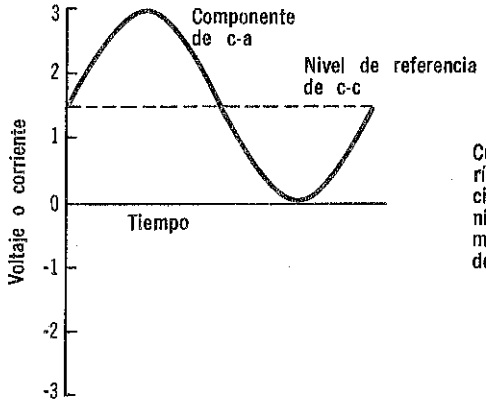
Un voltaje o corriente de c-a cambia de magnitud en una dirección, la misma forma en que cambia de magnitud en la otra dirección. Por lo tanto, varía con respecto a un nivel de corriente o voltaje cero

componente de c-a

La corriente continua fluctuante es similar a la c-c común en que no cambia de dirección. También es similar a la c-a, ya que varía en magnitud. Algunos tipos de c-c fluctuante se pueden considerar como *combinaciones* de c-a y c-c a menudo se hace esto en circuitos eléctricos reales. Una tensión o una corriente continua se combina con una tensión o una corriente alterna y se produce c-c fluctuante. Cuando esto sucede, la magnitud de la c-c varía en la misma forma que la de la c-c. La variación de c-a se llama componente de c-a y a la c-c se llama *nivel de referencia de c-c.*

La onda para una tensión o una corriente de este tipo es idéntica a una onda de c-a, excepto porque se encuentra completamente *arriba* del eje horizontal. La referencia de c-c para este tipo de onda es la línea horizontal que divide a la mitad a la onda de manera que una mitad queda arriba y la otra abajo. Así pues, la componente de c-a varía *con respecto* a la referencia de c-c.

Por medio de dispositivos llamados *transformadores* y *capacitores* se puede separar la componente de c-a de su referencia de c-c y convertirla en tensión o corriente alterna pura que varía con respecto a cero. Más adelante se estudiarán tales dispositivos.



Cuando un voltaje o corriente continua varía en forma de c-a, no cambia de dirección, sin embargo, fluctúa con respecto al nivel de referencia exactamente de la misma manera que una c-a fluctúa alrededor del nivel cero

resumen

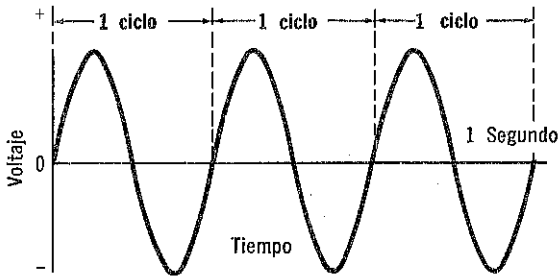
☐ El movimiento angular es un movimiento circular. Un círculo se divide en 360 grados. ☐ Una forma de onda muestra la magnitud y la dirección de la corriente y la tensión en cada instante. ☐ La dirección y la magnitud de una corriente o un voltaje continuos nunca cambian. ☐ Una onda sinusoidal es característica de la tensión producida por un generador simple de c-a. ☐ La onda tiene positivas y negativas, simétricas con respecto al nivel de referencia cero.

☐ Si una onda no es simétrica con respecto al eje horizontal, no se trata de una c-a pura. ☐ Una corriente o una tensión alterna es la que cambia periódicamente de dirección y varía en magnitud en una dirección, exactamente de la misma manera que lo hace en la otra dirección. ☐ La onda cuadrada aumenta instantáneamente desde cero hasta un máximo. Permanece en ese valor máximo durante cierto tiempo, disminuye instantáneamente a cero y aumenta en la dirección opuesta, a un valor máximo. Se mantiene en este valor máximo durante cierto tiempo, y luego disminuye instantáneamente a cero.

☐ La onda de "diente de sierra" aumenta linealmente de cero a un valor máximo. Luego disminuye hasta cero, invirtiendo su dirección y aumenta a un valor máximo en esta dirección opuesta. Cuando llega a este valor máximo de nuevo disminuye linealmente a cero. ☐ La c-c fluctuante cambia de valor, pero nunca va más abajo del eje horizontal. ☐ De una tensión continua fluctuante puede considerarse que está formada por una componente de c-a que varía arriba y abajo de un nivel de referencia de c-c. ☐ La componente de c-a se puede separar del nivel de referencia de c-c, por medio de dispositivos tales como transformadores y capacitores.

preguntas de repaso

1. ¿Qué es *movimiento angular*? ¿Cómo se expresa?
2. Con respecto al radio de referencia, ¿en qué dirección gira el radio rotatorio?
3. ¿Qué indica una forma de onda? ¿Cuál eje es generalmente el de tiempo?
4. ¿Qué es una *onda sinusoidal*? ¿Por qué se llama así?
5. ¿Qué es una onda de c-c simétrica con respecto al eje horizontal?
6. ¿Qué es una *onda cuadrada*? ¿Qué es una *onda de diente de sierra*?
7. ¿Puede una batería generar ondas cuadradas? ¿Qué componentes adicionales se necesitan, además de la batería?
8. ¿Qué es *c-c fluctuante*? ¿Alguna vez pasa debajo del eje horizontal?
9. Grafique una onda que represente una tensión fluctuante de c-c.
10. ¿Qué significa *componente de c-a*? ¿Qué significa *nivel de referencia de c-c*?



La frecuencia de un voltaje o corriente es el número de ciclos generados cada segundo. La frecuencia de este voltaje, por lo tanto, es de 3 c.p.s.

frecuencia

En una onda de c-a, la variación de tensión o corriente, por ejemplo, de cero a un máximo y nuevamente a cero, en la dirección positiva; y de cero a máximo y nuevamente a cero, en la dirección negativa, constituye un *ciclo* completo.

Al número de ciclos generados en un segundo se le conoce como la frecuencia de la tensión o de la corriente y se expresa en *ciclos por segundo*, o *cps*. Cuanto mayor sea el número de ciclos producidos en un segundo, más alta es la frecuencia. Esto significa que cuanto *más rápidamente* gire la armadura del generador, *mayor número de ciclos* genera en cada segundo y en consecuencia, la frecuencia de la tensión de salida será *más alta*. Si el generador simple girara a una velocidad de 10 revoluciones por segundo, la frecuencia sería de 10 cps; a 100 revoluciones por segundo, la frecuencia sería de 100 cps.

La mayor parte de la potencia eléctrica que se genera en los Estados Unidos tiene una frecuencia de 60 cps. En la mayor parte de los aparatos eléctricos hay una anotación de que el aparato debe usarse sólo en 60 cps. Estos aparatos están diseñados para esta frecuencia estándar de alimentación y si se conectan a una fuente que tenga una frecuencia diferente, pueden averiarse o bien no trabajar correctamente.

Las frecuencias eléctricas vigentes en otros países varían desde 25 a 125 cps. Por ejemplo, muchos de los países de Europa y Sudamérica emplean energía eléctrica con una frecuencia estándar de 50 cps. En algunos casos especiales —por ejemplo en sistema eléctrico aeronáutico— la frecuencia de la energía eléctrica empleada puede ser de 400 a 1,000 cps.

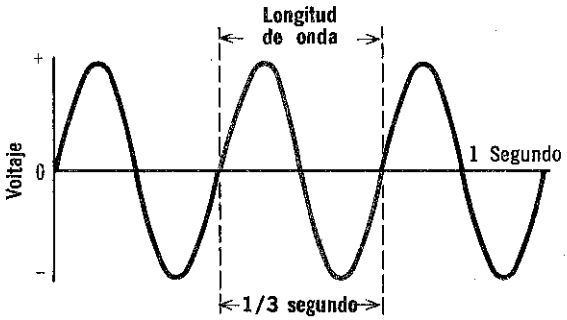
CONVERSION DE UNIDADES

1 kilociclo = 1,000 cps	1 megaciclo (Mc) = 1,000,000 cps
cps / 1,000 = kc	kc × 1,000 = cps
cps / 1,000,000 = Mc	Mc × 1,000,000 = cps
kc / 1,000 = Mc	Mc × 1,000 = kc

Puesto que la frecuencia del voltaje es 3 c.p.s., la longitud de onda es:

Longitud de onda (metros)
= 300,000,000 ÷ frecuencia
= 300,000,000 ÷ 3
= 100,000,000 metros

Al disminuir la frecuencia, la longitud de onda se hace más larga



longitud de onda

Se recordará, de lo estudiado en el volumen 1, que aunque cada uno de los electrones que integran la corriente eléctrica recorren un conductor en forma relativamente lenta, el campo eléctrico o impulso que produce el flujo de corriente, avanza en un conductor aproximadamente a 300,000 kilómetros por segundo. Puesto que la corriente avanza a una velocidad definida, sólo puede recorrer cierta *distancia* durante determinado *tiempo.* Y puesto que la frecuencia en realidad es una medida del número de *ciclos* por determinado *tiempo,* es posible calcular hasta dónde puede llegar la corriente durante un ciclo de tensión alterna. Esta distancia recibe el nombre de *longitud de onda* y es la *distancia* que puede recorrer la corriente en el tiempo que requiere la terminación de un ciclo completo de tensión alterna.

En una tensión de 60 cps, por ejemplo, un ciclo tarda un sesentavo de segundo. Y, puesto que la corriente recorre 300,000 kilómetros en un segundo, sólo puede avanzar 5,000 kilómetros. Puesto que la longitud de onda de una tensión alterna depende de su frecuencia y de la velocidad con la que el impulso eléctrico recorre el conductor, se puede cálcular según la siguiente ecuación:

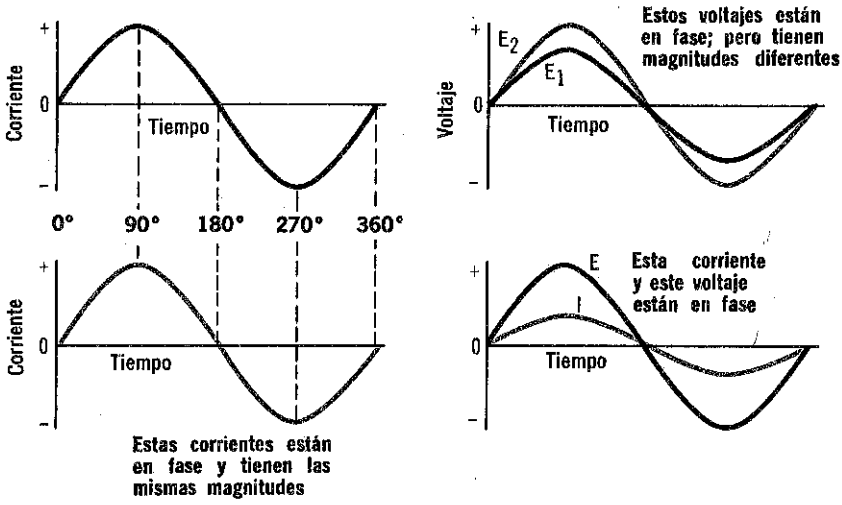
Longitud de onda = velocidad de la corriente/frecuencia

Por lo que respecta a la electricidad básica, la velocidad de la corriente es igual a la velocidad de la luz: 300,000 kilómetros por segundo. Entonces, la ecuación para la longitud de onda será:

Longitud de onda (metros) = 300.000,000/frecuencia

La longitud de onda para un ciclo de una tensión 60 cps será pues de 5.000,000 de metros.

Así, pues, *longitud de onda* es sólo otra forma de expresar la *frecuencia.* La longitud de onda no es muy importante en aplicaciones de potencia eléctrica pero suele tener aplicación en el campo de las comunicaciones.



La corriente y los voltajes están en fase cuando ambos llegan al mismo tiempo a sus máximos valores y a sus valores míminos

fase

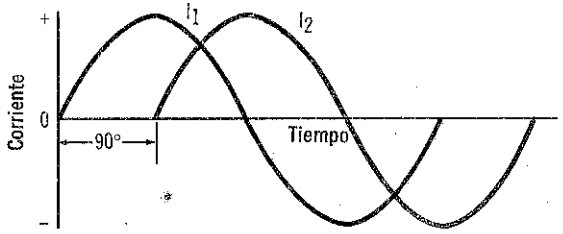
La salida de un generador simple de c-a varía en forma de onda sinusoidal. Por lo tanto, si dos de estos generadores se ponen a funcionar, cada uno generará una salida sinusoidal completa después de una revolución. Si los generadores se hacen funcionar en el *mismo instante* y giran exactamente a la *misma velocidad,* las dos formas de onda *comenzarán* y *terminarán* simultáneamente. También alcanzarán sus valores máximos y pasarán por cero al mismo tiempo. Entonces se dice que las dos formas de onda "coinciden" entre sí y que las tensiones que representan están *en fase.* De aquí se concluye que el término *fase* se usa para indicar la relación de *tiempo* entre tensiones y corrientes alternas.

El que dos corrientes o tensiones estén en fase no significa que sus *magnitudes* sean iguales. Las magnitudes máximas se alcanzan al mismo tiempo, pero sus valores pueden ser diferentes.

Aunque generalmente se usa el término fase para comparar la relación de tiempo de dos ondas, también se puede usar para indicar un punto de una onda en determinado instante. Como se muestra en la página 3-15, un ciclo completo se puede representar por grados. Con frecuencia, los grados reciben el nombre de *ángulos de fase.* La fase del máximo positivo es de 90 grados y del máximo negativo es de 270 grados. La onda sinusoidal es nula cuando los ángulos de fase son 0, 180 y 360 grados. Así, se puede considerar que cualquier punto de una onda sinusoidal tiene cierto ángulo de fase.

diferencia de fase

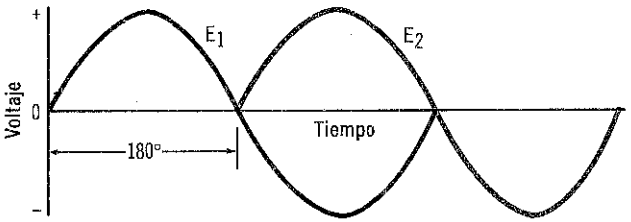
Si dos generadores idénticos arrancan al mismo tiempo y giran a la misma velocidad, sus valores máximo y mínimo ocurrirán simultáneamente, de manera que ambas salidas estarán *en fase*. Pero si un generador se arranca después del otro, sus valores máximo y mínimo de salida ocurrirán *después* de los valores correspondientes al otro generador. En el caso que se considera, ambas salidas están *defasados,* o, dicho de otra manera, existe una *diferencia de fase* entre ambas salidas. La magnitud de la diferencia de fase depende de cuánto atraso tenga una salida con respecto a la otra.



I_1 está adelantada 90 grados con respecto a I_2 o I_2 está atrasada 90 grados con respecto a I_1

Cuando los puntos máximo y mínimo de un voltaje o corriente ocurren antes de los puntos correspondientes de otro voltaje o corriente, ambas magnitudes están defasadas. Cuando esta diferencia de fase existe, uno de los voltajes o corrientes está adelantado y el otro atrasado

E_1 está adelantada 180 grados con respecto a E_2 o E_2 está atrasada 180 grados con respecto a E_1



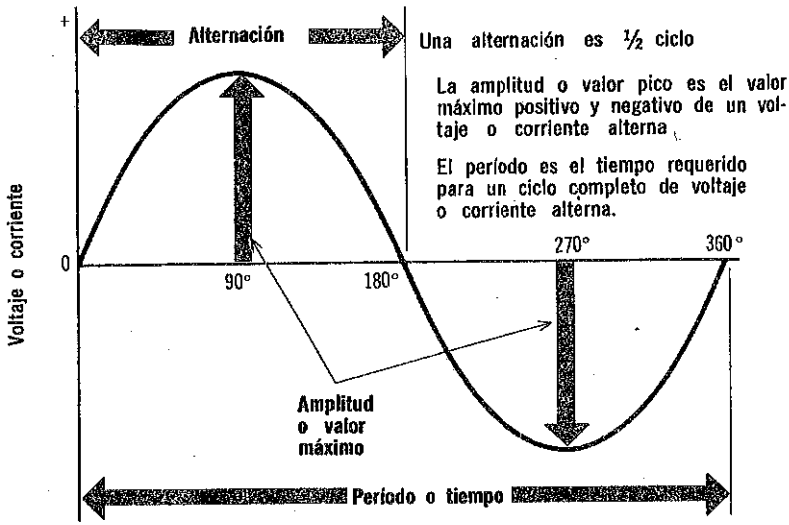
La diferencia de fase se puede expresar en fracciones de ciclo. Luego, si una salida comienza cuando la otra acaba de completar la mitad de un ciclo, la diferencia de fase es de medio ciclo, sin embargo, la diferencia de fase se mide generalmente en *grados* para mayor precisión. Y puesto que una onda sinusoidal completa corresponde a 360 grados, una diferencia de fase de medio ciclo será una diferencia de fase de 180 grados; una diferencia de fase de un cuarto de ciclo será una diferencia de 90 grados, etcétera.

Los términos *adelantado* y *atrasado* se usan para definir las posiciones relativas en el tiempo, de dos tensiones o corrientes que estén fuera de fase. La que está *adelante* en el tiempo, se dice que está *adelantada,* en tanto que la otra estará *atrasada.*

otros términos relativos a la c-a

El lector ya conoce la mayor parte de los términos que se usan normalmente para describir tensiones y corrientes alternas y sus formas de onda. Sin embargo, además de los términos de *ciclo, frecuencia, longitud de onda* y *fase*, existen otros términos relativos a la c-a que se usan muy a menudo y que el lector debe conocer. Por ejemplo, a veces a la mitad de un ciclo se le llama *alternación*.

Otro término es *amplitud*. La amplitud de una corriente o tensión alterna es el *valor máximo* que esa corriente o tensión alcanza. Es igual en la dirección positiva que en la negativa. En una onda, la amplitud es la distancia del eje horizontal al punto más alto de la onda sobre el eje, o bien, al punto más bajo, abajo del eje. La amplitud con frecuencia se conoce también como valor pico.



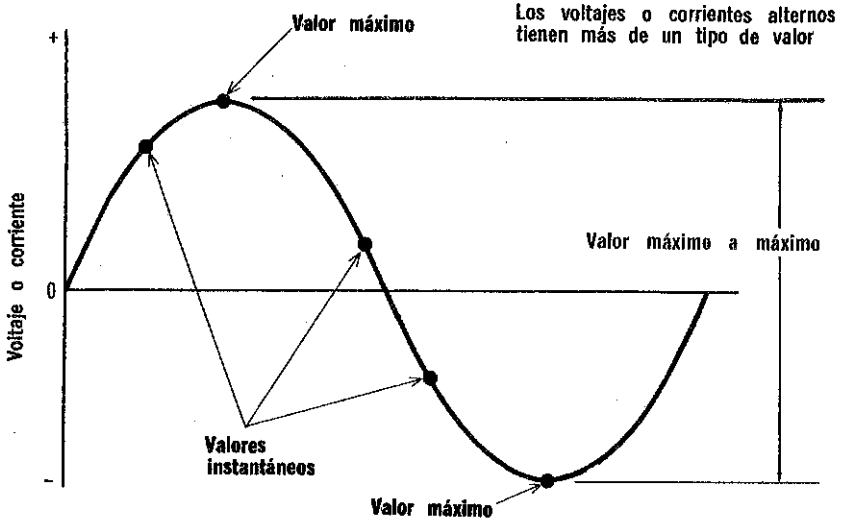
Otro término que debe conocerse es *período*. El período de una magnitud alterna —por ejemplo una tensión o una corriente alterna— es el tiempo que tarda dicha magnitud en efectuar un *ciclo completo*. Si se conoce la frecuencia, el período se puede calcular con facilidad. Por ejemplo, para una tensión de 60 cps, se generan 60 ciclos en un segundo. Por lo tanto, se requiere 1/60 de segundo para generar un ciclo. Así pues, el período se obtiene dividiendo la unidad entre la frecuencia:

$$\text{Período} = \frac{1}{\text{frecuencia}}$$

El período se indica en segundos y la frecuencia en ciclos por segundo o cps.

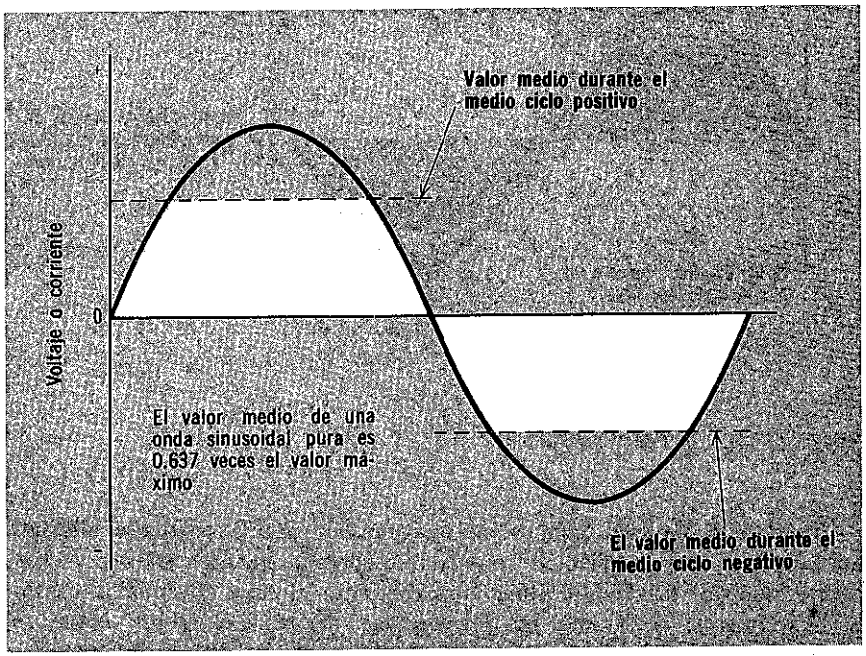
valores de tensión y c-a

Especificar el valor de tensión o corriente continua no es problema, ya que los valores de c-c no cambian. Por otra parte, los valores de c-a, tanto de tensión como de corriente, varían constantemente, de manera que no es fácil especificarlos. Antes de que se pueda dar el valor de una tensión o corriente alterna, generalmente hay que determinar qué tipo de valor se necesita. Y esto, a su vez, depende de la forma en que se desee emplear el valor. El más obvio probablemente sería el *valor pico* que, según se ha dicho, es la *amplitud* o valor máximo de la tensión o la corriente. Otro valor que se usa algunas veces es el valor pico-pico, al cual es el doble del valor pico. En una onda, el valor pico es la distancia vertical del valor máximo positivo al valor máximo negativo.



Ocasionalmente, el *valor instantáneo* de una tensión o corriente puede ser importante. Este es el valor de un instante determinado según el instante seleccionado, este valor puede ser cualquiera entre cero y el valor pico.

En la mayor parte de los casos, ninguno de estos valores (pico, pico-pico o instantáneo) son suficientes para dar los valores reales de tensiones y corrientes alternas. En su lugar, generalmente se usan otros dos valores, llamados valor *medio* y valor *efectivo*.



valores medios

El valor medio de una tensión o una corriente alternas es el *promedio* de todos los valores instantáneos d rante *medio ciclo,* o sea, una alternación. Puesto que durante medio ciclo la tensión o la corriente aumentan de cero al valor pico y luego disminuyen a cero, el valor promedio debe encontrarse en algún punto entre cero y el valor pico. Para una onda sinusoidal pura, que es la forma de onda más común en los circuitos de c-a, el valor promedio es 0.637 veces el valor pico. Para tensión, esto se expresa mediante la ecuación:

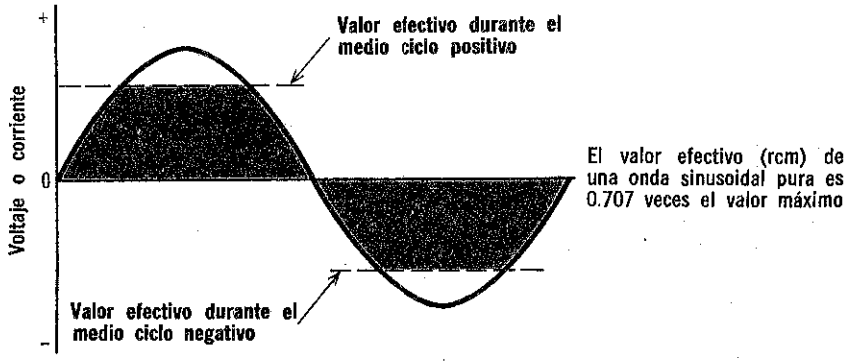
$$E_{MED} = 0.637 \text{ pico}$$

Por ejemplo, si la tensión pico de un circuito es de 100 volts, la tensión media será:

$$E_{MED} = 0.637\, E_{PICO} = 0.637 \times 100 = 63.7 \text{ volts}$$

La ecuación para calcular la corriente media en función de corriente pico es idéntica a la que se dio para el caso de la tensión. ión.

Debe tenerse cuidado de no confundir el valor medio, que es el promedio de *medio ciclo,* con el promedio de un *ciclo completo.* Puesto que ambos medios ciclos son idénticos, excepto porque uno es positivo y el otro negativo, el promedio sobre un *ciclo completo,* sería *cero.*



valores efectivos

Aunque los valores medios de una tensión o una corriente alternas son útiles, no tienen relación con valores correspondientes en c-c. Puede saberse que en un circuito fluye una corriente alterna cuyo valor medio es 10 amperes, pero esto no proporciona información sobre cómo se compararía con 10 amperes de c-c en el mismo circuito. Puesto que muchos equipos eléctricos tienen circuitos tanto de c-a como de c-c, es muy útil si se pueden expresar corrientes y tensiones alternas en valores que se relacionen con c-c. Es posible hacer esto gracias al uso de *valores efectivos.*

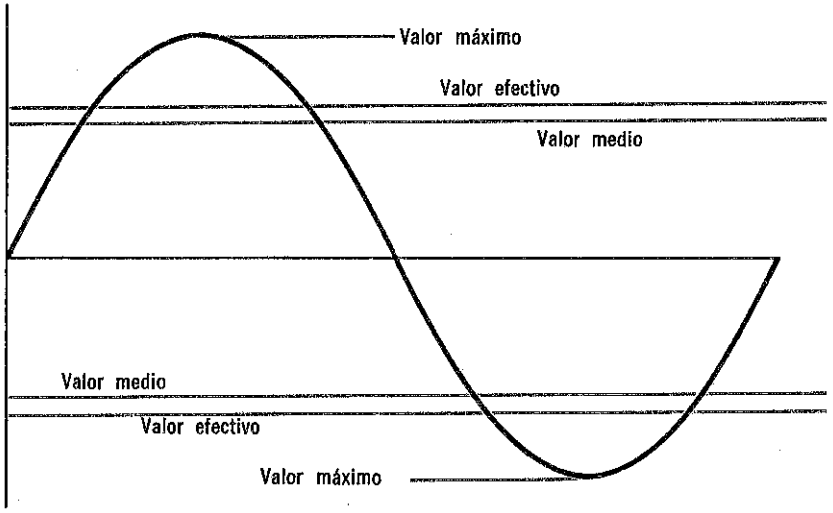
El valor efectivo de una tensión o corriente alterna es el que, en un circuito que sólo contenga resistencia, produce la misma cantidad de *calor* que la producida por una tensión o corriente continua del mismo valor. Por lo tanto, una corriente alterna cuyo valor eficaz sea de 1 ampere, genera el mismo calor en una resistencia de 10 ohms que una corriente directa de 1 ampere. El valor efectivo también se llama *raíz cuadrático media,* o *rom,* debido a la forma en que se obtiene: es igual a la raíz cuadrada del valor medio de los cuadrados de todos los valores instantáneos de corriente o tensión, durante medio ciclo.

En una onda sinusoidal pura, el valor efectivo es 0.707 veces el valor pico. Por lo tanto, las ecuaciones para calcular los valores efectivos de corriente y tensión son las siguientes:

$$E_{EF} = 0.707\ E_{PICO} \qquad E_{EF} = 0.707\ E_{PICO}$$

Por lo tanto, para una tensión pico de 100 volts el valor rcm de una tensión alterna sería 70.7 volts. Esto significa que un resistor conectado a una fuente de c-a de 100 volts, producirá el mismo calor que si se colocara en una fuente de c-c de 70.7 volts.

El valor efectivo se usa para clasificar tensiones y corrientes alternas. La tensión de 110 volts que llega a los hogares es el valor *rcm.* También lo es la tensión de potencia de 220 volts para usos industriales.



valores de conversión

Al trabajar con circuitos de c-a, a menudo será necesario *convertir* a otros valores los dados o medidos de tensión o de corriente alterna. Por ejemplo, puede ser necesario convertir un valor medio a un valor pico, o quizá un valor eficaz a valor medio. Para todas las conversiones entre valores pico, medio y efectivo, existen seis ecuaciones básicas que pueden aplicarse. Mediante la ecuación apropiada, es fácil convertir cualquiera de estos valores, a otro. En seguida aparecen las seis ecuaciones que se emplean para convertir valores de tensión y corriente.

CONVERSIÓN DE TENSIONES Y CORRIENTES C-A

Para convertir de	a	Usar las ecuaciones	
Pico	Medio	$E_{MED} = 0.637\ E_{PICO}$	$I_{MED} = 0.637\ I_{PICO}$
Pico	Eficaz	$E_{EF} = 0.707\ E_{PICO}$	$I_{EF} = 0.707\ I_{PICO}$
Medio	Pico	$E_{PICO} = 1.57\ E_{MED}$	$I_{PICO} = 1.57\ I_{MED}$
Medio	Eficaz	$E_{EF} = 1.11\ E_{MED}$	$I_{EF} = 1.11\ I_{MED}$
Eficaz	Pico	$E_{PICO} = 1.414\ E_{EF}$	$I_{PICO} = 1.414\ E_{EF}$
Eficaz	Medio	$E_{MED} = 0.9\ E_{EF}$	$I_{MED} = 0.9\ I_{EF}$

En algunos casos, puede ser necesario convertir a 0 de valores pico-pico. Para esto es preferible usar las ecuaciones para valor pico y tener presente que el valor pico-pico es lo doble del valor pico y, recíprocamente, que el valor pico es la mitad del valor pico-pico.

resumen

☐ El número de ciclos generados en un segundo se llama frecuencia de tensión o de corriente, y se expresa en ciclos por segundo o cps. ☐ La mayor parte de la potencia eléctrica generada en los Estados Unidos tiene una frecuencia de 60 cps. Otros países tienen establecidas diferentes frecuencias que varían de 25 a 125 cps. ☐ La frecuencia se puede expresar también en kilociclos, (Kc) y megaciclos (Mc). ☐ La distancia que recorre una onda durante un ciclo recibe el nombre de longitud de onda. ☐ La longitud de onda es igual a la velocidad de la onda dividida entre su frecuencia.

☐ El término fase indica la relación de tiempo para tensiones y corrientes alternas. ☐ La diferencia de fase indica la relación de tiempo que hay entre dos tensiones, corrientes o combinaciones de ambas. Esta diferencia se expresa en partes de un ciclo o en grados. ☐ Cuando dos ondas coinciden se dice que están en fase.

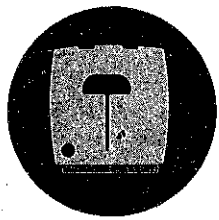
☐ Una alternación o alternancia es la mitad de un ciclo completo. ☐ El período de una onda es el tiempo en que ésta efectúa un ciclo completo. El período es igual a 1/frecuencia. ☐ El valor medio para una alternación (½ ciclo) de una onda sinusoidal, es igual a 0.637 veces el valor pico. El valor medio para un ciclo completo, es cero. ☐ Para una onda sinusoidal pura, el valor eficaz o rcm es igual a 0.707 el valor pico.

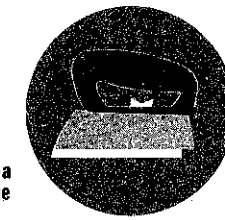
preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la frecuencia más común para potencia eléctrica en los Estados Unidos? ¿Cuál es en su país?
2. ¿En qué unidades se mide la frecuencia?
3. ¿Qué significa el término *fase*? ¿Qué significa *diferencia de fase*?
4. Defina *amplitud* y *alternación*.
5. ¿Cuál es el valor eficaz de una tensión cuya amplitud máxima es de 200 volts?
6. ¿Cuál es el valor rcm de una tensión cuyo valor pico-pico es de 200 volts?
7. ¿Cuál es el valor medio de la tensión de salida de una batería de 6 volts? ¿Cuál es el valor rcm?
8. El valor medio de una corriente de onda sinusoidal es 5 amperes? ¿Cuáles son sus valores pico, efectivo y pico-pico?
9. Una alternación de una onda sinusoidal tarda $^{1}/_{1000}$ de segundo. ¿Cuál es la frecuencia de la onda?
10. Cuál es el valor máximo de una onda sinusoidal cuando su valor efectivo es de 50 volts? ¿Cuál es cuando su valor pico-pico es de 50 volts? ¿Y cuál cuando el valor medio de una de sus alternaciones es de 50 volts?

circuitos resistivos de c-a

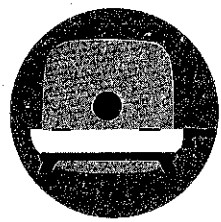
En un circuito de c-c, la resistencia es la única propiedad que se opone al flujo de la corriente, a que lo reduce. La resistencia también se opone al flujo de la corriente de un circuito de c-a, aunque en este caso no siempre es la única propiedad que lo hace. Posteriormente se verá que los circuitos de c-a tienen otras propiedades que, igual que la resistencia, afectan la relación de corriente y tensión en un circuito. Sin embargo, el tipo *más simple* de circuito de c-a contiene *sólo resistencia.* Además, en la misma forma que un circuito de c-c, esta resistencia incluye la resistencia particular de las cargas, la fuente de energía y los conductores.

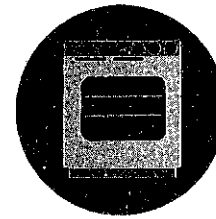




Un circuito resistivo c-a es aquél que contiene sólo resistencia

Los aparatos eléctricos usados para producir calor, por ejemplo tostadores, planchas, sartenes eléctricos y estufas, son ejemplos de circuitos resistivos c-a cuando se conectan a la fuente normal de energía del hogar

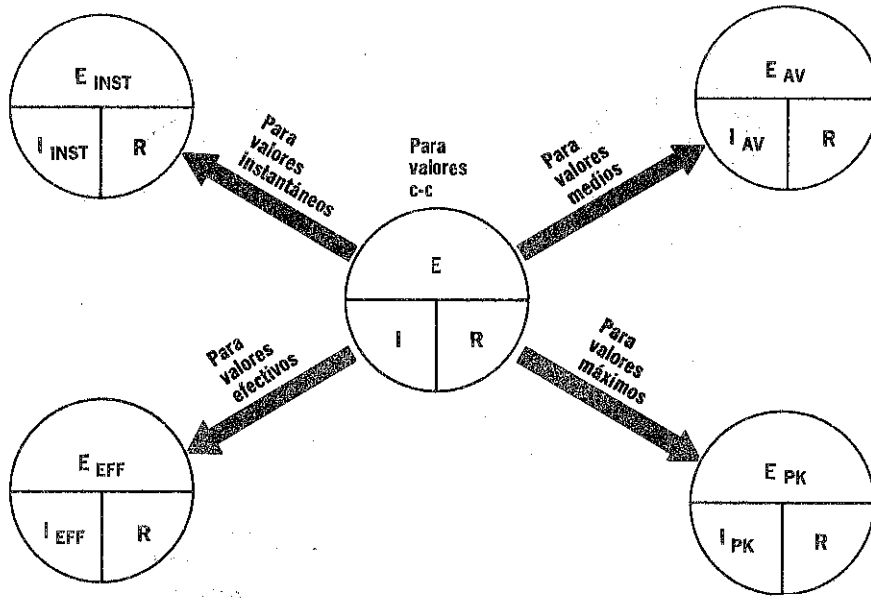




Sin embargo, en la práctica, no hay circuitos de c-a que contengan sólo resistencia. Las demás propiedades que influyen en la tensión y la corriente, siempre están presentes en alguna medida. Sin embargo, cuando sus efectos son muy pequeños comparados con los de la resistencia, se pueden considerar inexistentes. Entonces el circuito es completamente *resistivo.*

corriente y tensión

Cuando se aplica una tensión alterna a una resistencia, fluye una corriente alterna a través de la resistencia. La magnitud de la *corriente* en cualquier instante es *directamente proporcional* a la magnitud de la *tensión* en ese instante e *inversamente proporcional* al valor de la *resistencia.* Esta es la misma relación que existe entre corriente, tensión y resistencia en un circuito de c-c, de manera que la *ley de Ohm* también se aplica a los valores *instantáneos* de corriente y tensión en un circuito de c-a.

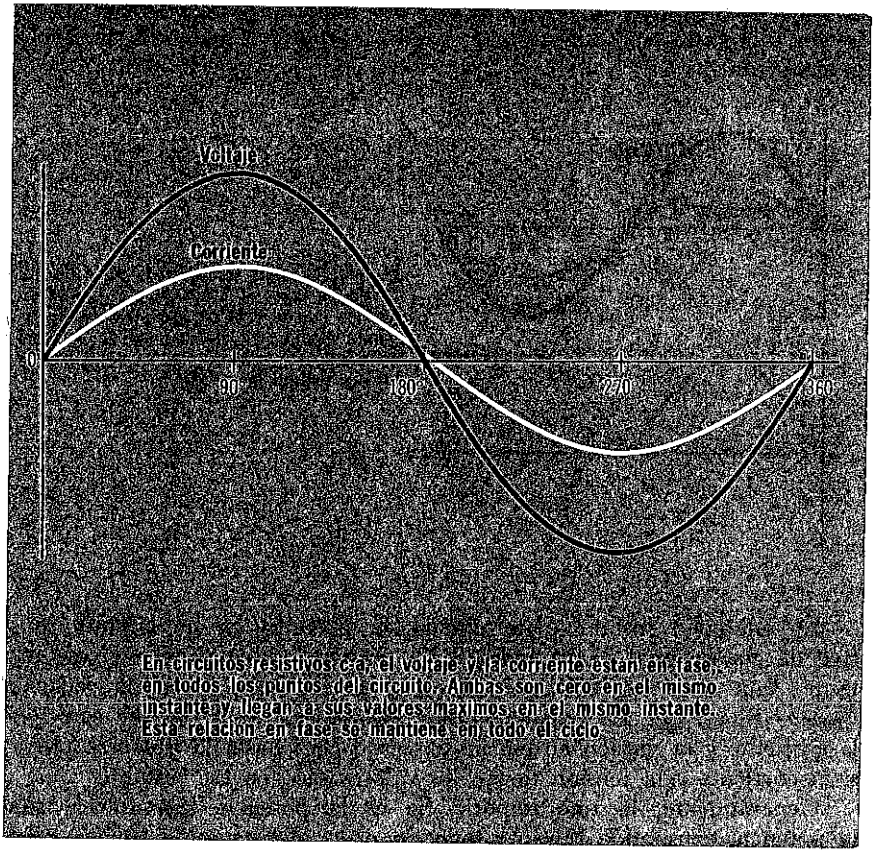


En circuitos c-a que contienen sólo resistencias, la relación entre la corriente y la resistencia es la de la Ley de Ohm

Puesto que los valores medio, eficaz y pico de una corriente y de una tensión alternas se derivan de los valores instantáneos, también se les aplica la ley de Ohm. Esto significa que, para determinar resistencias, corrientes y tensiones en circuitos resistivos de c-a, se aplican las mismas reglas y métodos que se estudiaron en el volumen 2 para circuitos de c-c.

relaciones de fase

Puesto que los valores instantáneos de corriente y tensión en un circuito de c-a que contiene sólo resistencia siguen la ley de Ohm, esto significa que en cualquier instante en que la tensión sea cero, la corriente será también cero cuando la tensión es máxima, la corriente también debe ser máxima, puesto que la resistencia es constante. Cuando la tensión se invierte, haciéndose negativa, la corriente también se invierte, debido a que siempre fluye de negativo a positivo. Así, en todo *instante* la corriente está exactamente *en fase* con la tensión aplicada.

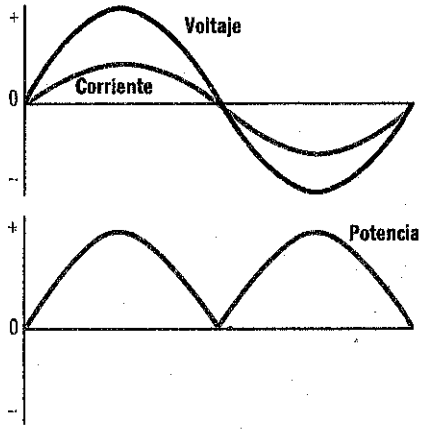


En circuitos resistivos c-a, el voltaje y la corriente están en fase en todos los puntos del circuito. Ambas son cero en el mismo instante y llegan a sus valores máximos en el mismo instante. Esta relación en fase se mantiene en todo el ciclo.

Por lo tanto, en un circuito resistivo de c-a, la corriente y la tensión están *en fase*. Esto ocurre no solamente por lo que se refiere a la corriente total del circuito y a la tensión de la fuente, sino que también ocurre en lo que respecta a la tensión y corriente en *todas las partes* del circuito.

potencia

La potencia consumida en determinado circuito depende de la tensión y la corriente que fluya en éste. Además, puesto que en un circuito puramente resistivo las tensiones y corrientes alternas siguen la ley de Ohm, podría pensarse que la potencia en este circuito se puede calcular de la misma manera que la potencia en un circuito de c-c. Esencialmente, lo anterior es correcto. La potencia en un circuito resistivo de c-a sigue la ecuación estándar de c-c, P = EI. Sin embargo, las tensiones de c-a tienen diferentes tipos de valores y, por lo tanto, también lo tendrá la potencia de c-a.



El valor de cada punto en la onda de potencia es igual al producto por la intensidad de la corriente en ese instante. El segundo medio ciclo de la onda de potencia es positivo ya que se obtiene del producto de dos cantidades negativas

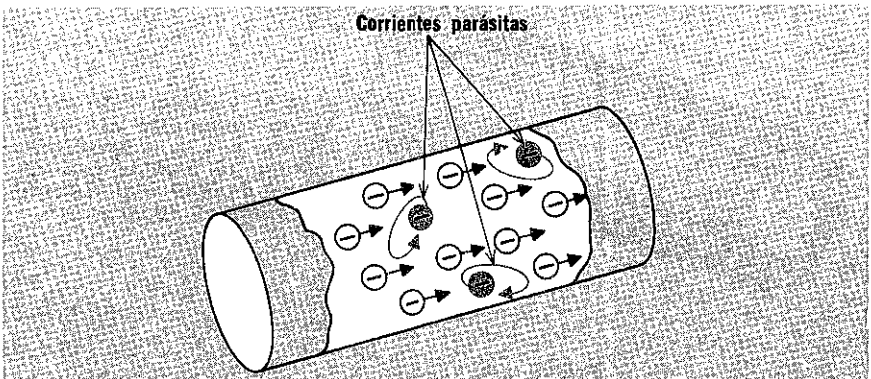
En cualquier instante determinado, la potencia en un circuito resistivo de c-a es igual al producto de la tensión y la corriente en ese instante. Ésta es la *potencia instantánea* y se encuentra según la ecuación $P_{INST} = E_{INST}I_{INST}$. La potencia instantánea puede variar desde cero —si la corriente y la tensión en ese instante son cero hasta la potencia pico— si la corriente y la tensión tienen los valores pico en ese instante.

Generalmente, lo que importa no es la potencia instantánea, sino la potencia consumida durante todo un ciclo. A ésta se le conoce generalmente como *potencia* o *potencia media.* Para encontrar su valor se pueden usar los valores *efectivos* o *rcm* de tensión y corriente, ya que estos valores son los que dan la misma potencia que el equivalente de c-c, según se vio anteriormente. Por lo tanto, la fórmula que se emplea para determinar esta potencia disipada en un circuito es

$$P = E_{EF}I_{EF}$$

Otra fórmula que se puede usar si se conoce el valor pico es

$$P = \frac{E_{PICO}I_{PICO}}{2}$$

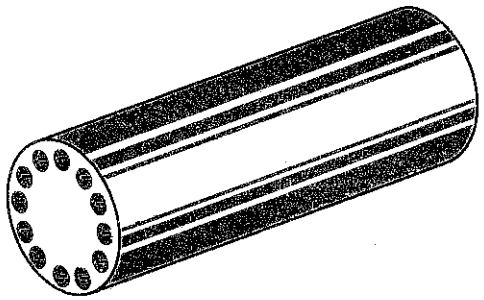


Las corrientes parásitas no se suman a la corriente principal del conductor; sin embargo, causan consumo de potencia. Por lo tanto, representan un aumento en la resistencia del conductor.

corrientes circulantes y efecto superficial

En circuitos de c-c, la resistencia es una propiedad física de los conductores, que se opone al flujo de la corriente. La resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporcional al área transversal del mismo. Esta resistencia a c-c, a resistencia *óhmica,* se opone a la corriente alterna, de la misma manera que a la corriente continua. Sin embargo, cuando fluye corriente alterna en un conductor, la resistencia que el conductor presenta a la corriente, es un poco *mayor* que la resistencia que el mismo conductor presentaría a corriente continua. Existen dos razones para este aumento de resistencia, debidas ambas al hecho de que cuando fluye corriente alterna en un conductor, origina *tensiones* dentro del conductor. La forma en que se verifica este fenómeno se explicará posteriormente. Las tensiones originadas en el conductor producen pequeñas corrientes independientes, llamadas *corrientes circulantes.* Estas, que se hallan en la resistencia del conductor, consumen potencia y, por lo tanto, representan una *pérdida de potencia* o aumento de resistencia en el circuito.

Además de producir corrientes circulantes, las tensiones originadas en un conductor por la corriente alterna, repelen al flujo de electrones hacia la *superficie* del conductor. Véase la ilustración de la página 3-38. De este modo, fluye más corriente en la superficie del conductor que en el centro del mismo. Esto tiene el efecto de *reducir* el *área transversal* del conductor y, según se ha estudiado, una disminución del área transversal produce un aumento en la resistencia. La concentración de flujo de corriente cerca de la superficie de un conductor, recibe el nombre de *efecto superficial.*

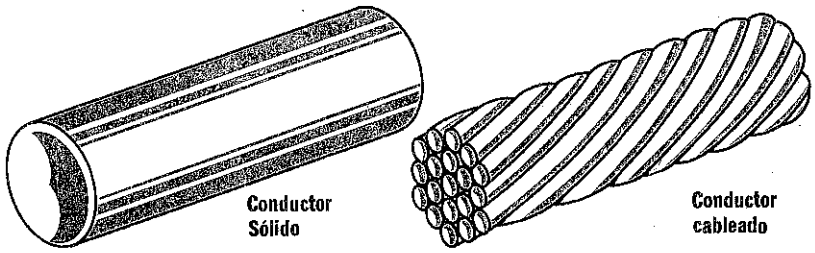


El efecto superficial (skin) resulta en una concentración más alta de corriente cerca de la superficie del conductor, de lo que es en el centro; efectivamente, esto reduce el área transversal del conductor

Resistencia c-a = Resistencia c-c + pérdidas por corrientes parásitas + pérdidas por efecto superficial

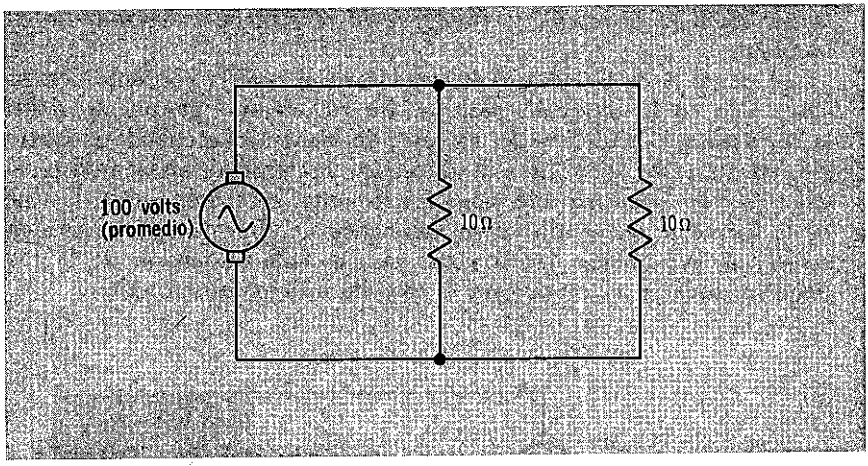
corrientes circulantes y efecto superficial (cont.)

Las pérdidas en conductores debidas a corrientes circulantes y efecto superficial son *directamente proporcionales* a la *frecuencia* de la corriente que fluye en el conductor. Cuanto más alta sea la frecuencia, mayores serán las pérdidas por corrientes circulantes y por el efecto superficial. Sin embargo, tales pérdidas sólo son significativas cuando la frecuencia es muy alta; por esta razón, se considerarán nulas y, por lo tanto, se hace caso omiso de ellas en el resto de este volumen. Los cables de potencia generalmente están formados por *alambres trenzados* a fin de reducir las pérdidas por efecto superficial. Esto surte efecto porque al sumar las áreas superficiales de cada uno de los alambres se obtiene un área superficial mayor que la de un conductor sólido.



El efecto superficial se reduce en los cables de potencia utilizando los alambres que lo forman. La superficie total transversal de los alambres es mayor que el de un solo conductor

problemas resueltos



Problema 1. ¿Cuál es el valor efectivo de la corriente total en el circuito?

Se pide el valor efectivo, pero sólo se da el valor medio de la tensión de la fuente. Se puede convertir dicho valor medio, al valor efectivo equivalente y así, se calcularía directamente el valor efectivo de la corriente total, también puede encontrarse el valor medio de la corriente total y, entonces, convertir al valor efectivo. Puesto que se requiere hacer una sola conversión, es preferible el primer método aunque ambos serían igualmente satisfactorios para resolver este problema.

La ecuación que se usa para convertir de tensión media a tensión efectiva se puede tomar de la tabla que aparece en la página 3-31.

$$E_{EF} = 1.11\, E_{MED} = 1.11 \times 100 \text{ volts} = 110 \text{ volts}$$

La resistencia total de los dos resistores de 10 ohms en paralelo es 5 ohms, y así se sabe ya el valor efectivo de la tensión aplicada al circuito y la resistencia del mismo. Puesto que se trata de un circuito puramente resistivo, se puede aplicar la ley de Ohm para determinar la corriente efectiva.

$$I_{EF} = E_{EF}/R = 110 \text{ volts}/5 \text{ ohms} = 22 \text{ amperes}$$

Problema 2. ¿Cuál es el valor pico de la corriente del circuito anterior?

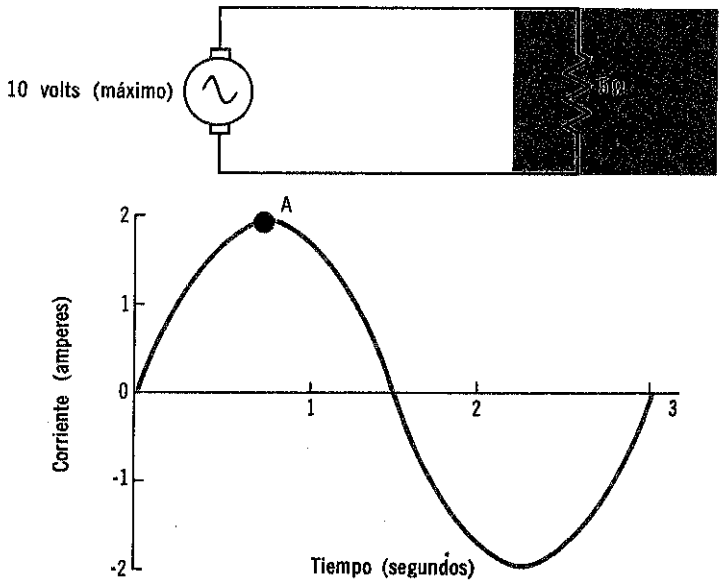
La corriente efectiva es 22 amperes y para convertirla a su valor pico equivalente, se usa la ecuación apropiada de la tabla de la página 3-31.

$$I_{PICO} = 1.414\, I_{EF} = 1.414 \times 22 \text{ amperes} = 25.1 \text{ amperes}$$

problemas resueltos (cont.)

Problema 3. La corriente en este circuito tiene la forma de onda mostrada. Cuál es la tensión a través de la resistencia en el instante A de la onda?

El punto A de la onda es el instante en el cual la corriente llega a su valor pico en la dirección positiva. En un circuito puramente resistivo, la corriente y la tensión están en fase; de manera que cuando la corriente alcanza su valor pico en una dirección, la tensión también llega a su valor pico en la misma dirección. Por lo tanto, en el instante A, la tensión de la fuente se encuentra en su valor pico de 10 volts. La tensión en la resistencia es también de 10 volts, ya que toda la tensión de la fuente tiene su caída en la carga para el caso de un circuito en serie.



Problema 4. ¿Cuál es la potencia consumida en el circuito?

Se pueden convertir los valores de corriente y tensión a los valores efectivos equivalentes y luego calcular la potencia mediante la ecuación $P = E_{EF}I_{EF}$. Sin embargo, puesto que ambos son valores pico es más fácil aplicar la ecuación que expresa la potencia en función de tensión y corriente pico. Es la siguiente:

$$P = \frac{E_{PICO}I_{PICO}}{2} = \frac{10 \text{ volts} \times 2 \text{ amperes}}{2} = 10 \text{ watts}$$

resumen

☐ La ley de Ohm se aplica a valores instantáneos de corriente y tensión en un circuito de c-a, igual que en un circuito de c-c. ☐ En un circuito resistivo de c-a, la corriente y la tensión están en fase. ☐ La potencia media disipada en un resistor de un circuito de c-a es $P = E_{EF}I_{EF}$ y $P = E_{PICO}I_{PICO}/2$.

☐ La potencia instantánea se encuentra mediante la ecuación $P_{INST} = E_{INST}\ I_{INST}$. Puede variar de cero a un máximo, el cual ocurre cuando la corriente y la tensión alcanzan sus valores pico al mismo tiempo, como sucede en un circuito puramente resistivo.

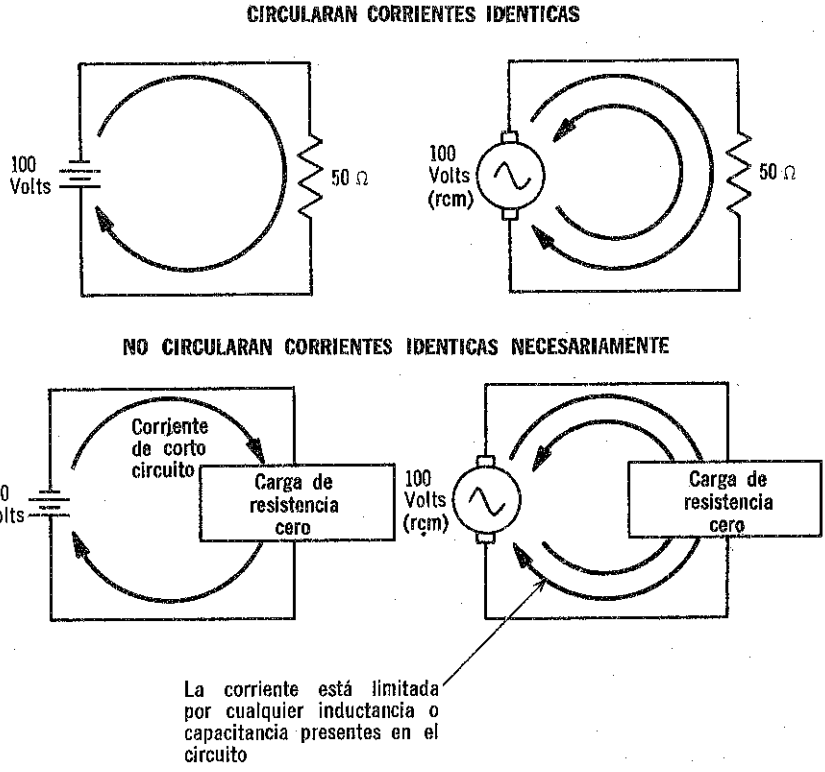
☐ Las pérdidas en conductores de c-a debidas a corrientes circulantes y efecto superficial son directamente proporcionales a la frecuencia de la corriente. Debido a que estas pérdidas sólo son importantes en altas frecuencias, se hace caso omiso de ellas y se consideran nulas en este volumen. ☐ Los cables de potencia generalmente se construyen de alambres torcidos unos sobre otros helicoidalmente para reducir las pérdidas por efecto superficial.

preguntas de repaso

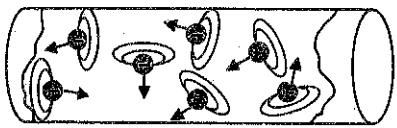
1. ¿Qué son las *corrientes circulantes*? ¿En qué forma se relacionan con la frecuencia?
2. ¿En qué consiste el *efecto superficial?* ¿Existe en circuitos de c-c?
3. ¿Cómo se puede contrarrestar el efecto superficial en los cables de potencia? ¿Por qué surte efecto esto?
4. ¿Cuál es la potencia media disipada en un circuito de c-a en donde la tensión máxima es de 20 volts y la corriente máxima es de 40 amperes?
5. ¿Cuál es la potencia media disipada en un circuito de c-a en el que la tensión efectiva es de 70 volts y la corriente efectiva es de 30 amperes?
6. La corriente instantánea en un resistor es de 14 amperes y la tensión instantánea en el resistor es de 28 volts. ¿Cuál es la potencia instantánea que se ha originado?
7. El valor pico de la tensión en un circuito de c-a es de 100 volts y la corriente efectiva es de 7 amperes. ¿Cuál es la potencia media disipada?
8. La potencia pico originada en un resistor es de 1,500 watts cuando la tensión efectiva en el resistor es de 500 volts. ¿Cuál es la corriente media en una alternación?
9. Una alternación de una tensión de onda sinusoidal tiene un valor promedio (medio) de 75 volts y el valor pico de la corriente es de 3 amperes. ¿Cuál es la potencia media producida?
10. La potencia media producida en un resistor es de 2,000 kilowatts y la tensión pico-pico es de 200 kilovolts. ¿Cuál es el valor de la corriente efectiva del resistor?

circuitos no resistivos de c-a

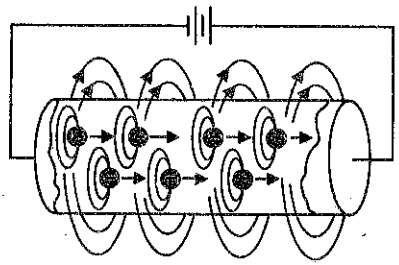
En un circuito de c-c, la resistencia es lo *único* que se opone al flujo de corriente. Por lo tanto, un circuito de c-c *sin* resistencia, o con una resistencia muy baja, es un *corto circuito*. En este caso fluirán corrientes excesivas en el circuito, y no se puede lograr función útil. Por otra parte, en los circuitos de c-a, *no* es lo único que se opone a la corriente. Hay otras dos propiedades del circuito, llamadas *inductancia* y *capacitancia*, que se oponen al flujo de la corriente alterna. Por lo tanto, si se presenta cualquiera de estas propiedades la corriente alterna queda *limitada*, aunque la resistencia del circuito fuera cero.



La naturaleza y características de la inductancia y la capacitancia se describen en las páginas restantes de este libro. La inductancia se estudia primero y posteriormente la capacitancia. Sin embargo, antes de examinar la inductancia, se revisarán algunos de los principios básicos de electromagnetismo, ya que la inductancia es básicamente un fenómeno electromagnético.



Si no hay voltaje aplicable y en consecuencia no hay corriente, los campos magnéticos de los electrones libres se anulan. No existe campo fuera del conductor



Con la aplicación de un voltaje, los electrones libres se mueven en la misma dirección y sus campos magnéticos se combinan. El campo se extiende hacia afuera del conductor

campo magnético alrededor de un conductor

Una corriente eléctrica es formada por muchos *electrones* libres que se mueven en un conductor en la *misma dirección*. Cada electrón en movimiento establece su propio campo magnético y, puesto que los electrones se mueven en la misma dirección, sus campos particulares se *combinan* para producir un campo magnético general.

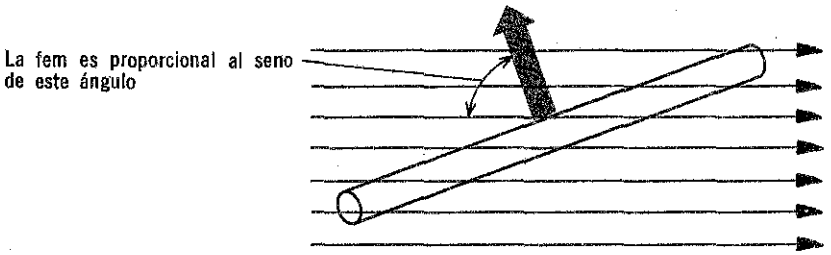
En un conductor al que no se le aplica tensión, la corriente es cero. Los electrones libres del conductor se desplazan y originan sus campos magnéticos particulares, pero su movimiento es *al azar*. En todo instante, por cada electrón que se mueva en una dirección, existe otro que se mueve en la dirección opuesta. A esto se debe que los campos magnéticos particulares se opongan o se *anulen entre sí*. Como resultado, no hay campo magnético fuera del conductor.

Si se aplica una tensión al conductor, muchos de los electrones libres comienzan a desplazarse en la misma dirección. Entonces sus campos magnéticos se combinan y se produce un campo magnético general. Este campo magnético se extiende fuera del conductor, de modo que cada línea de fuerza forma un círculo o trayectoria cerrada alrededor del conductor. Si la tensión aplicada al conductor aumenta, también la corriente aumenta. Entonces más electrones contribuirán al campo magnético general, de manera que su intensidad será mayor. La intensidad de un campo magnético generalmente se indica por medio del número de líneas de fuerza individuales y de la distancia que hay entre ellas. Los campos intensos tienen muchas líneas y están muy poco espaciadas.

La dirección del campo magnético alrededor de un conductor que lleva corriente, se conoce por medio de la *regla de la mano izquierda,* la cual se estudió en el volumen 1: Si se cierra la mano izquierda alrededor de un conductor de manera que el pulgar señale a la dirección del flujo de la corriente, el campo magnético que rodea al conductor tendrá la dirección de los dedos que rodean al conductor.

fem inducida

Cuando un electrón *se mueve* a través de un *campo magnético,* se ejerce una fuerza sobre el electrón como resultado de la interacción entre el campo magnético del electrón y el campo que atraviesa. Por lo tanto, cuando se mueve un trozo de conductor a través de un campo magnético, se ejerce una fuerza sobre *cada uno* de los electrones libres del conductor. Efectivamente, estas fuerzas se suman y el efecto es que se genera o se *induce* una fem en el conductor. La dirección de la fem inducida depende de la dirección de movimiento del conductor con respecto a la dirección del campo magnético y se puede determinar mediante la *regla de la mano derecha* que se estudió en el volumen 1. La regla de la mano derecha establece que si el pulgar, el índice y el dedo medio de la mano se colocan formando ángulos rectos entre sí, de manera que el pulgar señale la dirección hacia donde se desplaza el conductor y el índice señale la dirección del campo magnético, entonces el dedo medio señalará la dirección de la fem inducida.

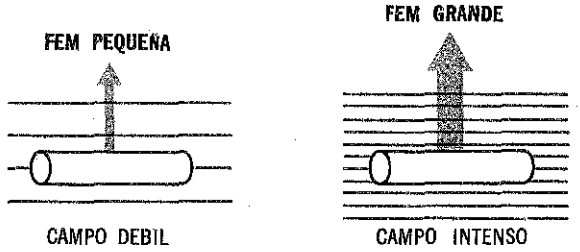


La magnitud de la fem inducida es *directamente proporcional* a la intensidad del campo magnético, a la longitud del conductor y a la velocidad con que el conductor atraviese el campo magnético. El aumento de cualesquiera de estos tres factores producirá un aumento en la fem inducida. La magnitud de la fem inducida depende también de la dirección hacia donde se mueva el conductor en el campo; si el conductor se mueve formando un ángulo recto con respecto a la dirección del campo, la fem es máxima. Si la dirección del conductor es paralela a la dirección del campo, no se induce fem. Véanse las ilustraciones en la página 3-45. Por otra parte, si el conductor se desplaza en una dirección que no esté ni en ángulo recto ni sea paralela a la dirección del campo, la fem es proporcional al seno del ángulo formado entre la dirección del campo y la dirección del movimiento del conductor.

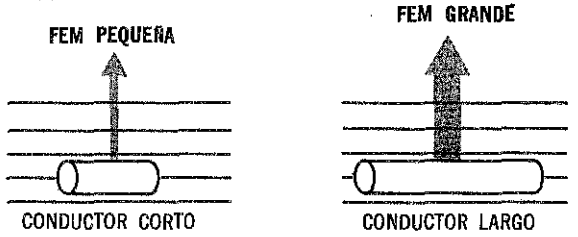
La descripción anterior se refiere al caso de un *conductor móvil* en un *campo magnético estacionario.* Según se estudiará posteriormente, se pueden obtener exactamente los mismos resultados con un *campo magnético movible* y un *conductor estacionario.*

factores que determinan la fem inducida

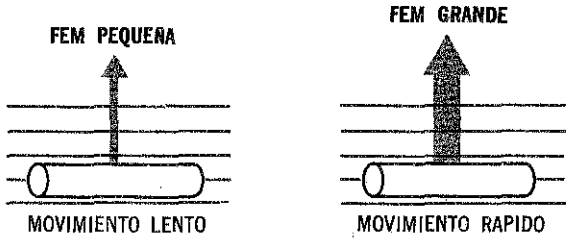
INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNETICO



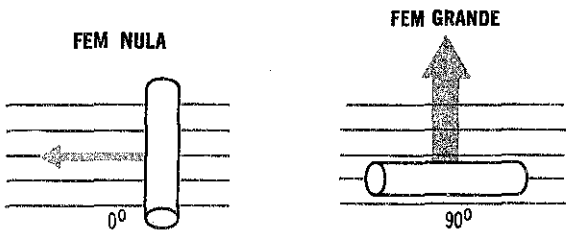
LONGITUD DEL CONDUCTOR

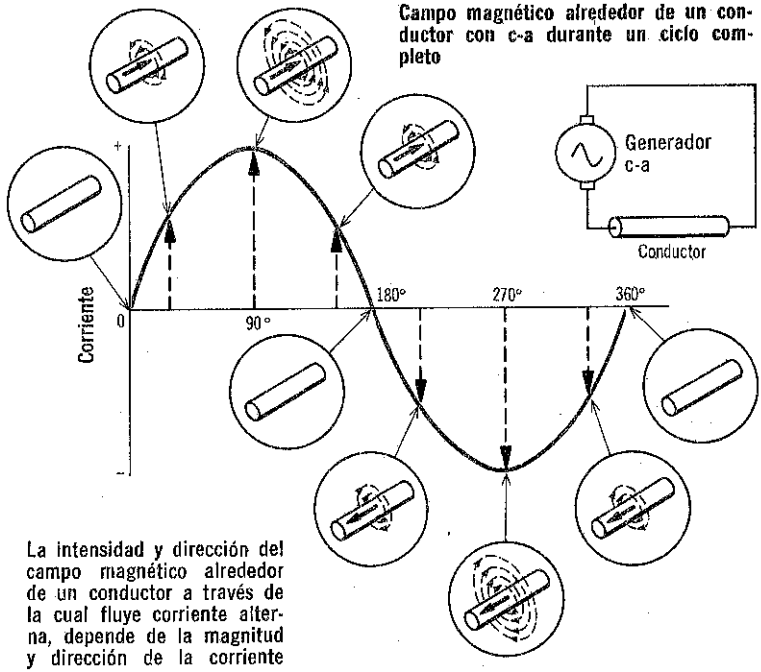


VELOCIDAD DEL CONDUCTOR



DIRECCION DEL CONDUCTOR CON RELACION AL CAMPO





La intensidad y dirección del campo magnético alrededor de un conductor a través de la cual fluye corriente alterna, depende de la magnitud y dirección de la corriente

campo magnético originado por una corriente alterna

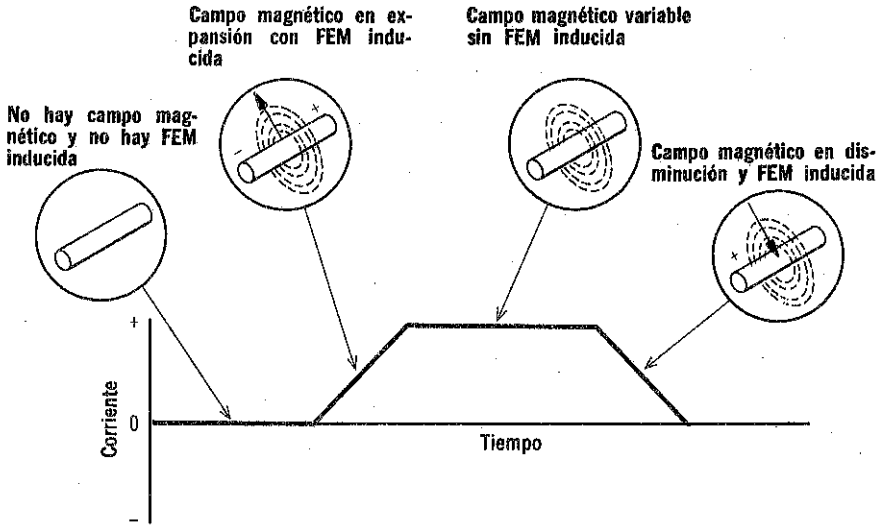
Cuando se aplica una tensión de c-c a un conductor la corriente pasa casi instantáneamente, de cero a su valor máximo. El campo magnético de alrededor del conductor también pasa casi instantáneamente de cero a su intensidad máxima y *se mantiene* con esta intensidad en tanto haya *flujo de corriente*. Cuando se abre el circuito, la corriente se reduce a cero y el campo magnético alrededor del conductor disminuye también a cero. Generalmente, se puede imaginar la disminución de un *campo* magnético, como *reducción* de las líneas de fuerza de regreso a los electrones que las produjeron.

Cuando una corriente alterna fluye en un conductor, varía constantemente en magnitud. Esto significa que varía también el número de electrones libres que avanzan en la misma dirección. Como resultado, el campo magnético alrededor del conducto, *cambia constantemente* en *intensidad*. Cuanto mayor sea la corriente, más intenso será el campo. En forma semejante, cuanto menor sea la corriente, más débil será el campo.

Puesto que la corriente alterna cambia periódicamente de dirección, el campo magnético que produce también invierte su dirección. En cualquier instante, la dirección del campo magnético se determina por la dirección del flujo de corriente.

autoinducción

Al igual que los valores que adquiere la corriente alterna en un conductor al recorrer un ciclo completo, el campo magnético alrededor del conductor aparece y luego desaparece. En seguida se origina nuevamente en la dirección opuesta y nuevamente desaparece. Cuando el campo magnético comienza a crecer desde cero, las líneas de fuerza o *líneas de flujo* se expanden desde el centro del conductor hacia afuera. Al expanderse hacia afuera, se puede considerar que cortan al conductor. Téngase presente que se induce una fem en cualquier conductor que se mueva en un campo magnético. En este caso, el *campo* es el que se mueve, pero



Cualquier cambio en la corriente de un conductor causa una fem autoinducida en el conductor. Si la corriente es cero o constante, no se induce fem

el efecto sería el mismo si el alambre se moviera y el campo fuera estacionario. Todo lo que se requiere es un movimiento relativo entre el campo magnético y el electrón. Por lo tanto, al expanderse el campo magnético hacia afuera del conductor, tiende a producir un flujo de corriente propio. En forma similar, cuando el campo magnético desaparece, las líneas de flujo vuelven a atravesar el conductor y nuevamente se induce una fem.

Obsérvese que todo cambio en la corriente produce una expansión o una reducción del campo magnético alrededor de un conductor, lo cual a su vez induce una fem en el conductor. A esto se llama *autoinducción.*

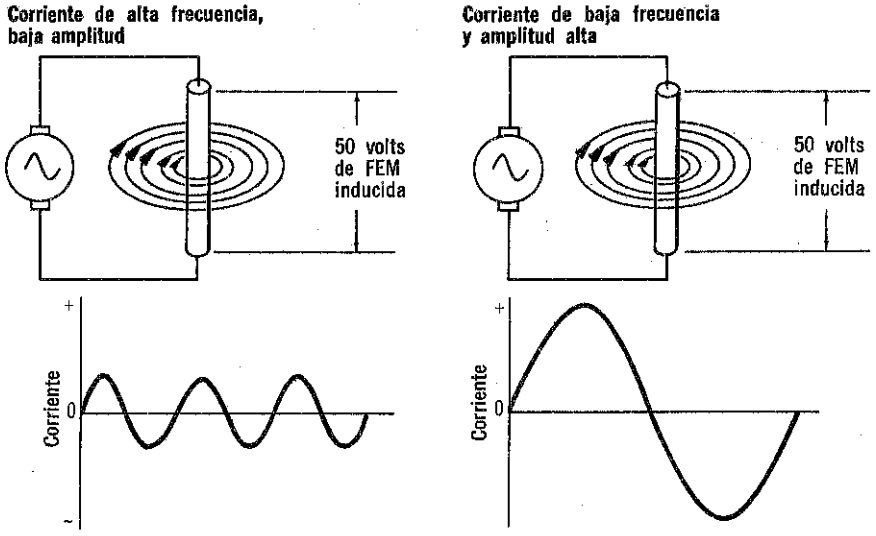
magnitud de la fem autoinducida

La fem inducida en un conductor mediante un cambio en la corriente del conductor, tiene *magnitud* y *polaridad* igual, que todas las fem. Un factor que determina la magnitud de la fem inducida es la rapidez con que se expande o se reduce el campo magnético, lo cual, a su vez, depende de la rapidez con que cambia la corriente. En el caso de corriente alterna pura, la cual varía como onda sinusoidal, la *frecuencia* es una medida de la rapidez con que cambia la corriente. Por lo tanto, la magnitud de la fem inducida depende de la frecuencia de la corriente. Para un valor dado de corriente, cuanto más alta sea la frecuencia, más rápidamente cambia la corriente, por lo que será mayor la fem inducida. Análogamente, cuanto más baja sea la frecuencia, menor será la fem inducida.

La magnitud de la fem inducida depende también del valor de la *corriente*. Las corrientes mayores producen campos magnéticos más intensos. Y cuando un campo intenso se reduce hay más líneas de flujo que cortan al conductor y se induce una fem mayor. Por lo tanto, para una frecuencia dada, las corrientes de amplitud más alta, producen mayores fem inducidas.

En resumen, la magnitud de la fem autoinducida, es proporcional a la amplitud y frecuencia de la corriente.

La frecuencia de una corriente alterna y su amplitud determinan la magnitud de la fem autoinducida

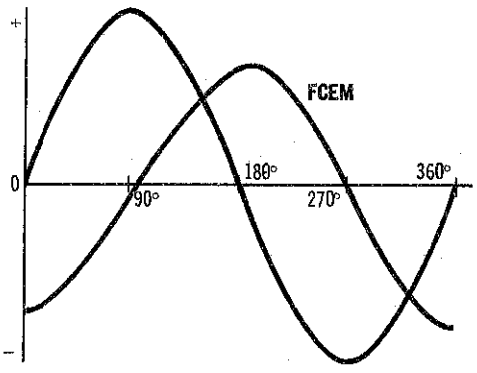


polaridad de la fem autoinducida

Toda fem tiene una polaridad, y una fem autoinducida no es la excepción. Se podría pensar que la polaridad de una fem inducida siempre tiene la misma dirección de la corriente que la produce; sin embargo, si se piensa en términos de una corriente directa que fluye un conductor, se verá que esto no puede ser. Cuando una corriente directa aumenta de cero a su valor máximo, el campo magnético que origina alrededor del conductor, induce una fem en el conductor. Si esta fem tuviese la misma dirección que la corriente, produciría un aumento en esta última. Dicho aumento produciría más fem inducida, que a su vez haría aumentar más a la corriente. Esta secuencia continuaría hasta que fluyera tanta corriente que algo en el circuito se quemaría. Es bien sabido que esto no sucede; de manera que la polaridad de la fem inducida no siempre tiene la misma dirección que la corriente que la produce. La polaridad de una fem inducida se obtiene por la regla de la mano derecha, pero es difícil de apreciar cuando se aplica a la *autoinducción.*

La dirección de la fem autoinducida la explicó por vez primera el físico alemán H. F. E. Lenz, por lo que actualmente se conoce como *ley de Lenz: Un cambio en la corriente produce una fem, cuya dirección es tal que se opone al cambio de la corriente.* En otras palabras, cuando una corriente está disminuyendo, la fem inducida tiene la misma dirección de la corriente y trata de mantenerla en su valor, sin que disminuya. Y cuando una corriente está aumentando, la polaridad de la fem inducida es opuesta a la dirección de la corriente, tratando de evitar que ésta aumente. La relación entre la fem inducida y la tensión aplicada que produce el flujo de corriente es tal que ambas tensiones siempre están *defasadas 180 grados.*

La magnitud de la fcem inducida en cualquier punto depende de la rapidez de cambio de las líneas de flujo. Así pues, a 90 y 270 grados, en donde I momentáneamente es constante en su valor máximo, la rapidez del cambio es cero y también lo es la fcem



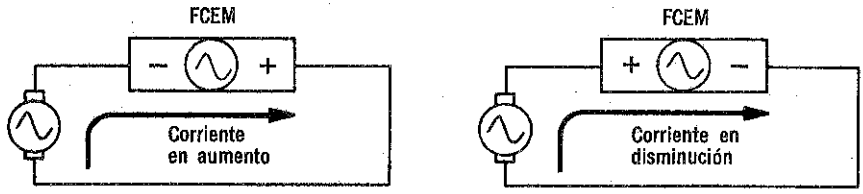
En 0, 90 y 180 grados, cuando I pasa por cero y cambia de dirección, la rapidez del cambio es máxima y también lo es la fcem. Así pues, I y la fcem están defasadas 90 grados entre sí.

polaridad de la fem autoinducida (cont.)

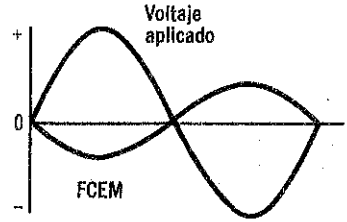
Cuando la tensión aplicada es máxima en una dirección, la fem inducida es máxima en la dirección opuesta, y cuando la tensión aplicada aumenta o disminuye en una dirección, la fem inducida aumenta o disminuye en la dirección opuesta. Puesto que la acción de la fem inducida es oponerse a la acción aplicada, suele llamársele *fem contraria* o *fuerza contraelectromotriz*; generalmente se abrevia *fcem*.

El hecho de que la fcem se oponga siempre a la tensión aplicada, pero algunas veces se oponga y algunas veces ayude al flujo de corriente, puede parecer confuso. Esta aparente contradicción, es causada por la relación de fase entre la tensión aplicada y la corriente, lo cual será explicado posteriormente.

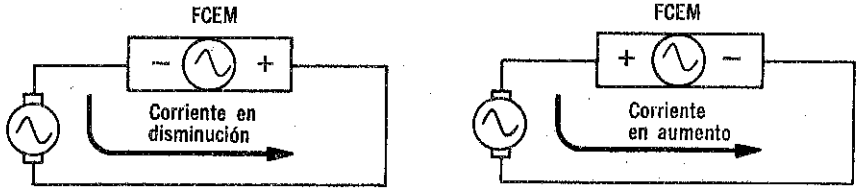
La fuerza contraelectromotriz se opone a cualquier cambio en la corriente



La polaridad de la fcem es opuesta a la corriente del circuito cuando la corriente aumenta; igual sucede con la corriente del circuito cuando ésta disminuye



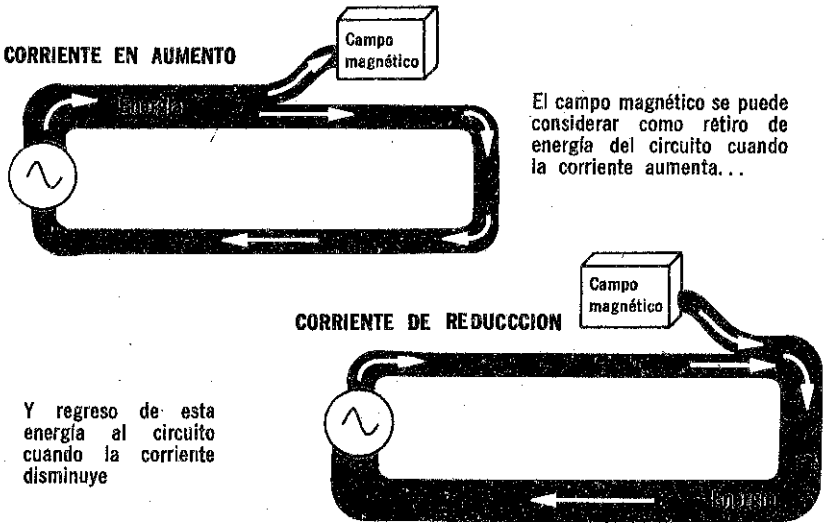
La fcem siempre se opone al voltaje aplicado. La fcem también se conoce como fuerza contraelectromotriz (fcem)



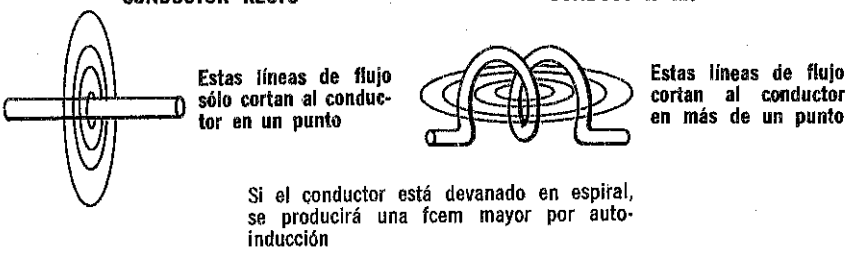
autoinducción con respecto a energía

La autoinducción se puede explicar en relación con la *energía.* Para hacerlo, se considera que el campo magnético que rodea a un conductor con corriente *intercambia* energía con el circuito. Cuando la corriente del circuito *aumenta,* la energía *sale* del circuito y es almacenada en el campo magnético. Esta es la razón por la que el campo magnético se hace más fuerte. La salida de la energía del circuito se manifiesta como una disminución del potencial a lo largo del conductor y corresponde a la fcem que se opone a la tensión de la fuente.

Cuando la corriente deja de aumentar, el campo magnético se vuelve constante y deja de tomar energía del circuito; entonces, toda la energía alimentada por la fuente de energía es consumida por la corriente del circuito. El campo magnético almacena toda la energía que ha tomado del circuito hasta que la corriente comienza a *disminuir.*



Cuando la corriente comienza a disminuir, el campo magnético comienza a desaparecer y la energía almacenada regresa al circuito. La energía retorna en forma de un aumento de potencial a lo largo del conductor. Esto corresponde a la fem autoinducida en la misma dirección de la tensión de la fuente, a la que se suma. Por lo tanto, en relación con la energía, la autoinducción consiste en tomar energía de un circuito cuando la corriente aumenta y el regreso de esta energía al çircuito cuando la corriente disminuye.



efecto que tiene la forma del conductor sobre la autoinducción

Ahora se sabe que la autoinducción en un conductor se opone a cualquier cambio en la corriente del conductor, y que la cantidad o magnitud de la autoinducción está determinada por la amplitud y frecuencia de la corriente. Sin embargo, existe otro factor que afecta a la autoinducción: la *forma física* del conductor. Hasta ahora, solamente se han considerado conductores *rectos*. Cuando se está originando un campo magnético en este tipo de conductor, cada línea de flujo corta al conductor en un lugar, y la fcem producida se determina por el número total de líneas de flujo.

Si un conductor está *embobinado* en espiras adyacentes, la situación es totalmente diferente. En primer lugar, la longitud del conductor es mayor, de manera que se induce una fcem mayor. Por otra parte, hay otra razón por la que la fcem aumentará aún más en un conductor embobinado. Los cambios en la corriente siguen originando un campo magnético alrededor del conductor, pero ahora cada línea de flujo no corta al conductor en un solo punto. Primero, todas las líneas de flujo se unen para originar un campo más intenso y, como cada línea de flujo se extiende hacia afuera, corta al conductor en la espira en la cual se produce y también corta a las *espiras adyacentes* del conductor. Cuanto más se suman y expanden las líneas de flujo, mayor cantidad de espiras cortan. Por lo tanto, cada línea de flujo, genera una fcem en más de un punto a lo largo del conductor. Las polaridades de todas estas fcem son tales que se *suman* para producir una fcem total, la cual es mucho mayor de la que sería generada en un conductor recto por el mismo cambio de corriente. Cuando se reducen las líneas de flujo, la situación es la misma. Cada línea corta a más de una espira del conductor y genera una fcem en cada espira que corta. Nuevamente, las fcem se suman para producir una fcem total elevada.

Se puede ver que, para determinada corriente, la cantidad de fcem producida en un conductor, depende del número de líneas de flujo generadas, la forma del conductor y la frecuencia de la corriente.

resumen

☐ Si hay inductancia o capacitancia en un circuito de c-a, el flujo de corriente es limitado. ☐ Una fem inducida se produce cuando un conductor corta líneas magnéticas de fuerza. Un conductor que se mueve en un campo magnético estacionario, o bien un campo magnético que se mueve y un conductor estacionario, producirán una fem inducida.

☐ Cuando una corriente variable fluye en un conductor, origina un campo magnético que induce una fem en el conductor. Esto se llama autoinducción. ☐ La magnitud de la fem autoinducida es proporcional a la magnitud y la frecuencia de la corriente. ☐ La dirección de una fem autoinducida se explica por la ley de Lenz, la cual establece que un cambio en la corriente produce una fem cuya dirección es tal que se opone a dicho cambio. ☐ La fem autoinducida a veces se llama fem contraria o fuerza contraelectromotriz y se abrevia fcem.

☐ Se puede considerar que la autoinducción es un intercambio de energía cuando la magnitud de la corriente en un conductor cambia. ☐ La forma física de un conductor también determina la magnitud de la autoinducción. ☐ Los conductores algunas veces se embobinan para aumentar el número de líneas de flujo que corta el conductor, lo que da por resultado una mayor fem autoinducida.

preguntas de repaso

1. ¿Cuáles propiedades, además de la resistencia, limitan la corriente en un circuito de c-a?
2. ¿Cuál regla determina la dirección del campo magnético alrededor de un conductor con corriente? Enuncie la regla.
3. Para un conductor que atraviesa un campo magnético, ¿qué regla indica la dirección de la fem inducida cuando se conoce la dirección del campo magnético? Enuncie la regla.
4. ¿Qué factores determinan la magnitud de la fem inducida?
5. ¿Qué es *autoinducción*?
6. ¿Cuáles son los dos factores de los que depende la magnitud de una fem autoinducida?
7. ¿Qué significa el término fuerza *contraelectromotriz?* ¿Qué significa fem contraria?
8. Enuncie la ley de Lenz.
9. ¿Qué determina la dirección de la fem autoinducida? ¿Cómo explica esto la ley de Lenz?
10. ¿Cómo se puede explicar la autoinducción en relación con la energía?

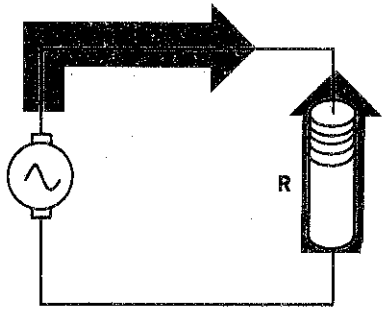
inductancia

Puesto que para una amplitud y frecuencia dadas de una corriente, la fcem producida en un conductor depende de la forma del mismo; la relación exacta entre la corriente, la fcem y la forma del conductor, puede expresarse matemáticamente así: cuando el número de líneas de flujo producidas por la corriente se multiplica por una constante que está determinada por la forma de la bobina, el producto es igual a la fcem producida. La ecuación es como sigue:

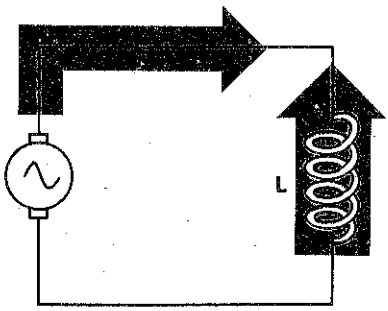
$$E_{fcem} = L \times \text{número de líneas de flujo}$$

La constante L —que depende de la forma del conductor— recibe el nombre de *inductancia* del conductor.

La inductancia de conductores *rectos*, generalmente es *muy baja* y, para las necesidades de este estudio, se puede considerar nula. Por otra parte, la inductancia de *conductores embobinados* puede ser *elevada*, y desempeña una función importante en el análisis de circuitos de c-a.

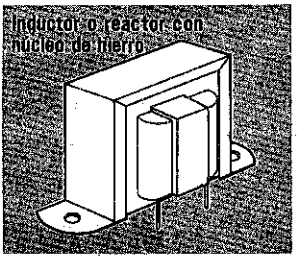


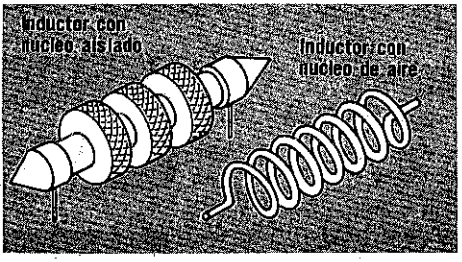
Los resistores se oponen a toda corriente en un circuito. Tienen resistencia, la cual se representa por R

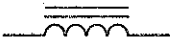


Los inductores se oponen a cualquier cambio de la corriente en el circuito. Tienen inductancia, la cual se representa por L

Aunque la inductancia es en realidad una característica física del conductor, a menudo se la define en función del efecto que tiene en el flujo de la corriente. Dicha definición de inductancia es como sigue: *La inductancia es la propiedad de un circuito eléctrico que se opone a cualquier cambio de corriente en el circuito.* A partir de esta definición se puede concluir que la conductancia no tiene ningún efecto sobre una corriente directa. Sólo se opone a cambios en la corriente. Los conductores embobinados generalmente se usan en circuitos de c-a para introducir deliberadamente inductancia en el circuito y tal conductor embobinado recibe el nombre de *inductor.*







Este es el símbolo que representa a un inductor con núcleo de hierro

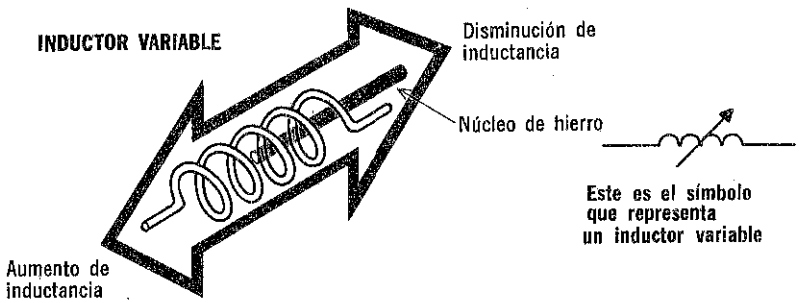
Este es el símbolo que representa a un inductor con núcleo aislado o con núcleo de aire.

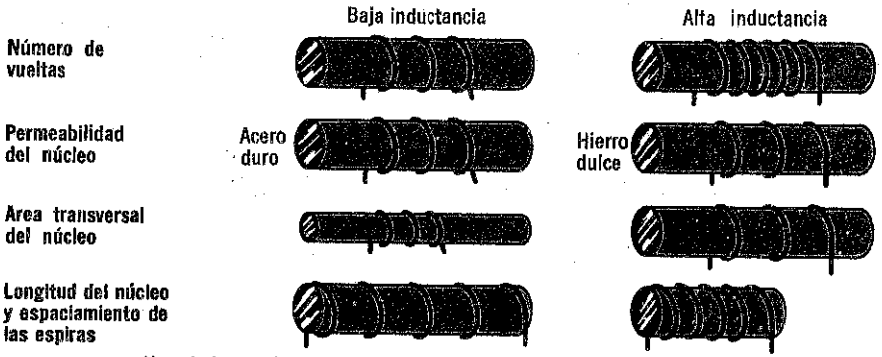
inductores

Básicamente, todos los inductores se hacen devanando una longitud de conductor alrededor de un núcleo. El conductor suele ser alambre sólido de cobre revestido con aislamiento esmaltado; y su núcleo está formado, ya sea de material magnético, por ejemplo hierro pulverizado, o bien de material aislante. Cuando se devana un inductor alrededor de un núcleo aislante, éste funciona sólo como soporte, ya que no tiene propiedades magnéticas. Si se usa alambre grueso y pesado en la fabricación del inductor, generalmente no se necesita un núcleo; las espiras rígidas del alambre se mantienen por sí solas. Cuando no se usa núcleo magnético, se dice que el inductor tiene *núcleo de aire*.

Los inductores con valores de inductancia fijos que no se pueden cambiar, reciben el nombre de inductores fijos. Los inductores cuya inductancia se puede variar en cierta escala, se llaman inductores variables. Generalmente, los inductores variables están hechos de manera que el núcleo se puede mover dentro y fuera del devanado. Entonces la posición del núcleo determina el valor de la inductancia.

A los inductores se les llama también frecuentemente *chokes* o *bobinas*. Estos tres términos significan lo mismo, y el lector debe familiarizarse con todos ellos.





Una inductancia elevada se obtiene con un inductor razonablemente pequeño, devanando el alambre alrededor del núcleo en muchas capas

factores que determinan la inductancia

Las características físicas, o forma geométrica, tanto del *núcleo* como de los *devanados* alrededor del núcleo, afectan a la inductancia producida. Los inductores con *núcleo magnético* tienen inductancias mucho mayores que los que tienen *núcleos aislantes* o *de aire*. Esto se debe a que todas las líneas de flujo producidas por un inductor, atraviesan el núcleo y, al hacerlo, lo magnetizan si está hecho de material magnético. Entonces las líneas de flujo del campo magnético del núcleo, *se suman* y *refuerzan* a las líneas de fuerza originadas por el devanado y, por lo tanto, se produce una mayor fcem. Para determinado número de espiras en el devanado inductor, un núcleo con una mayor *área transversal* producirá más líneas de flujo. Además, cuanto *más largo* sea el núcleo para un número de vueltas dado, menos líneas de flujo producirá. La inductancia, por lo tanto, es directamente proporcional al área transversal del núcleo e inversamente proporcional a su longitud.

El número y espaciamiento de las espiras individuales de alambre en un inductor, también afectan considerablemente a la inductancia. Cuantas *más espiras* se tengan, *mayor* será la inductancia. Y cuanto *más próximas* estén las espiras entre sí, también será mayor la inductancia. La relación entre la inductancia y todos los factores físicos que la afectan, se expresa según la siguiente ecuación:

$$L = \frac{0.4\pi N^2 \mu A}{l}$$

donde N es el número de espiras; μ es la permeabilidad del núcleo, la cual es grande para los materiales magnéticos y baja para otros materiales; A es el área del núcleo y L la longitud.

Para cada material de núcleo magnético existe un punto en que el núcleo *se satura*; entonces, ni siquiera cambios considerables en la corriente pueden aumentar el flujo y se produce muy poca fcem.

valores de inductancia y fcem

En realidad, la inductancia es una medida de cuánta fcem se genera en un circuito o componente para cierto cambio en la corriente a través de ese circuito o componente. En otras palabras, es la cantidad de fcem producida por un cambio unitario de corriente. La unidad de inductancia es el *henry,* llamada así en honor del físico americano Joseph Henry, quien comparte con Michael Faraday el honor del descubrimiento de la inducción. El henry se define así: *un inductor o una bobina tienen una inductancia de un henry cuando una corriente que cambia a razón de 1 ampere por segundo, produce una fcem de 1 volt.* Por lo tanto, mientras mayor sea la inductancia, mayor será el número de henrys. La abreviatura para henry es *h.*

El henry es una unidad relativamente grande. Por esta razón, la inductancia se da frecuentemente en unidades menores, como el milihenry y el microhenry. Un milihenry es 1/1000 de un henry y un microhenry es 1/1.000,000 de un henry. Milihenry se abrevia *mh* y microhenry, μh.

Puesto que la cantidad de fcem producida es parte de la definición del henry, se puede calcular la fcem que genera un inductor en un circuito cuando se conoce el valor de su *inductancia,* así como la *amplitud* y la *frecuencia* de la corriente. Una forma de la ecuación para fcem es

$$\text{fcem} = -L(\Delta I/\Delta t)$$

El signo menos indica que la fcem es de polaridad opuesta a la tensión aplicada. El término ΔI, que se lee "delta I", es el cambio de corriente que tiene lugar en un intervalo Δt, que es el cambio en tiempo. Por ejemplo, para aplicar la ecuación, considere la fcem desarrollada por un inductor cuya inductancia es de 10 henrys cuando la corriente cambia de 5 a 3 amperes en 1 segundo.

$$\text{fcem} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -10\left(\frac{5-3}{1}\right) = -20 \text{ volts}$$

Nótese que, cambiando la inductancia (L) o el ritmo de cambio de la corriente $(\Delta I/\Delta t)$, que es la frecuencia, se pueden obtener varios valores de fcem. La tabla que aparece a continuación indica cómo se elevaría la fcem al aumentar el ritmo de cambio de corriente.

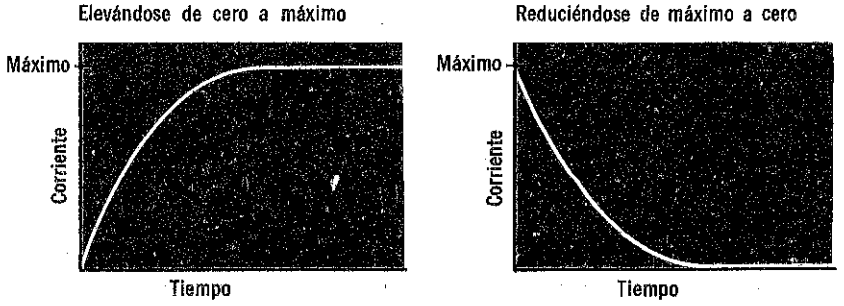
L (HENRYS)	I (AMPERES)	t (SEGUNDOS)	fcem (VOLTS)
1	1	1	1
1	1	1/2	2
1	1	1/4	4
1	1	1/10	10
1	1	1/20	20
1	1	1/50	50
1	1	1/100	100
1	1	1/500	500
1	1	1/1.000	1.000

circuitos inductivos de c-c

En un circuito de c-c, los únicos *cambios* de corriente ocurren cuando se cierra el circuito y cuando se abre. Si el circuito contiene sólo resistencia, estos cambios se pueden considerar *instantáneos*. Así, pues, cuando se cierra el circuito la corriente aumenta instantáneamente, desde cero hasta su valor máximo. Por otra parte, cuando se cierra el circuito, la corriente baja instantáneamente a cero. Si se agrega inductancia a un circuito de c-c, por ejemplo, mediante un inductor, la corriente ya no puede variar instantáneamente. Cuando el circuito se cierra, la corriente tiende a aumentar instantáneamente, pero se le opone la fcem generada por el inductor. Así, en lugar de aumentar instantáneamente, se requiere cierto tiempo para que la corriente alcance su valor máximo. Cuanto mayor sea la inductancia, mayor será la fcem producida y mayor tiempo tardará la corriente el alcanzar su máximo.

La situación es idéntica cuando el circuito se abre y la corriente tiende a disminuir instantáneamente hasta cero. La fcem se opone al cambio de manera que la corriente disminuye gradualmente hasta cero. La onda de cualquier cambio de corriente de c-c a través de un inductor tiene la misma *forma básica*, independientemente de los valores de corriente e inductancia. Esta forma de onda indica que la corriente varía con rapidez al principio y luego cada vez menos, hasta que llega a su valor máximo si se trata de una corriente creciente, o a cero si es una corriente decreciente. Debido a su forma, a esta onda se le llama onda o curva *exponencial*.

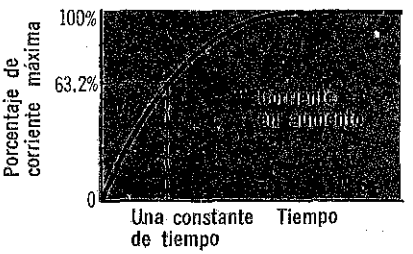
Corriente continua a través de una inductancia



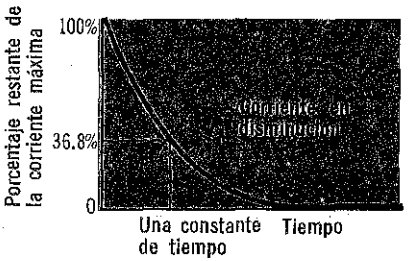
En un circuito de c-c que contenga inductancia, la corriente sigue una forma de onda exponencial al cambiar de cero a máximo (es decir, se cierra el circuito)

La corriente sigue una forma de onda exponencial cuando cambia de máximo a cero (es decir, se abre el circuito)

En todo momento en que la corriente no cambia, la inductancia no tiene efecto sobre el circuito



En una constante de tiempo, la corriente aumenta de 0 a 63.2% de su valor máximo



En una constante de tiempo, la corriente desciende a 63.2% de su valor máximo, dejando 36.8%

constante de tiempo

En un circuito de c-c que contenga inductancia y resistencia, la corriente varía gradualmente entre cero y su máximo y entre su máximo y cero. Independientemente de los valores de inductancia y resistencia del circuito, estos cambios siguen siempre un patrón *similar*. Inicialmente, la variación es máxima y luego se va reduciendo gradualmente hasta que la corriente alcanza su valor constante, que es su máximo, o bien, cero. Durante estos cambios, existe una relación entre los *valores* alcanzados por la corriente y el *tiempo* que tarda en alcanzarlos. Esta relación se expresa por medio de una cantidad llamada *constante de tiempo*.

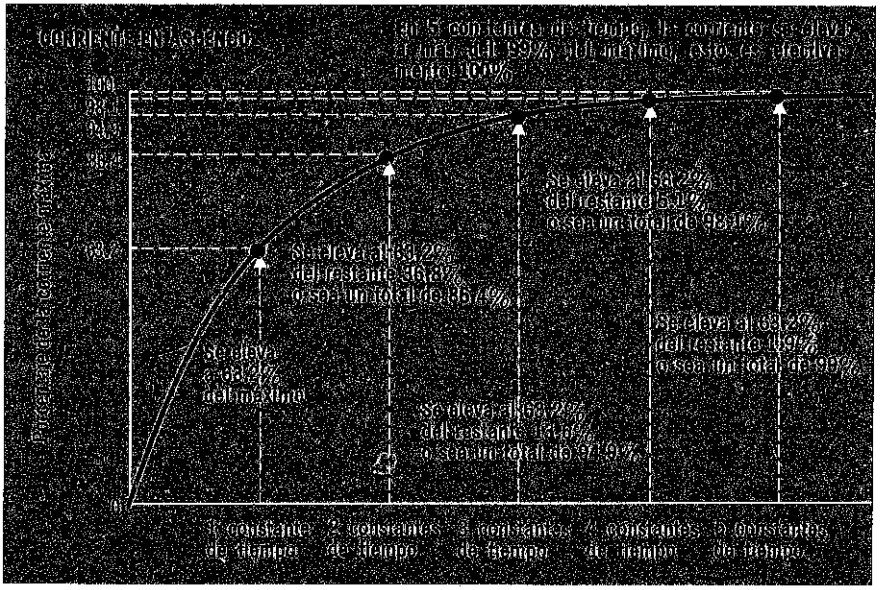
La constante de tiempo se define como el tiempo que la corriente necesita para aumentar a 63.2 *por ciento* de su valor máximo o disminuir 63.2 por ciento de su valor máximo. En cualquier circuito de c-c, la constante de tiempo depende del valor de la *inductancia* y *resistencia*. El valor de la constante de tiempo es directamente proporcional a la inductancia e inversamente proporcional a la resistencia. Si se conocen ambas cantidades se puede calcular la constante de tiempo a partir de la siguiente ecuación.

$$\text{Constante de tiempo} = \text{inductancia/resistencia} \quad \text{ó} \quad t = L/R$$

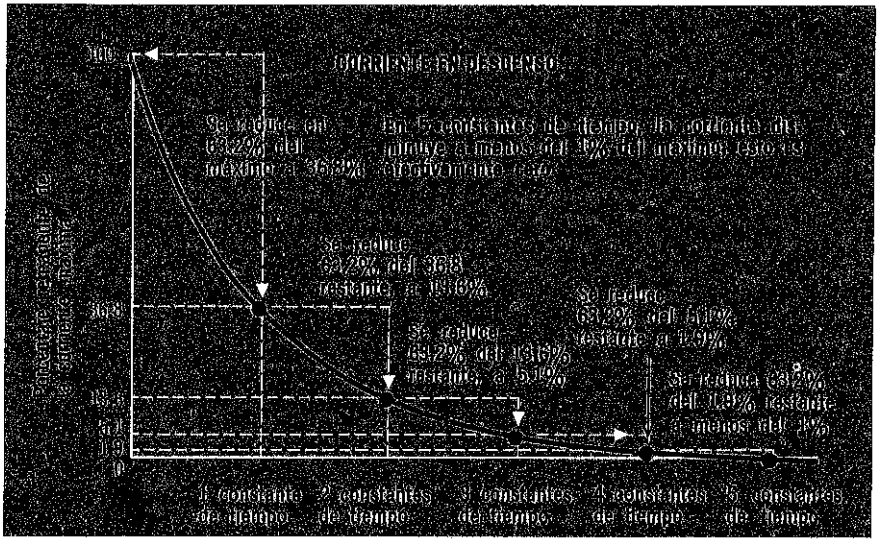
Por medio de esta ecuación, si la inductancia está expresada en henrys y la resistencia en ohms, la constante de tiempo lo estará en segundos. En la práctica, las constantes de tiempo generalmente son muy pequeñas. Por esta razón, a menudo se expresan en *mili*segundos, *micro*segundos; un milisegundo es un milésimo (1/1,000) de segundo, y un microsegundo un millonésimo (1/1.000,000) de segundo. Con frecuencia milisegundo se abrevia *miliseg* y microsegundo, *µseg*.

Una vez conocida la constante de tiempo para un circuito, es fácil calcular cuánto tiempo necesita la corriente para pasar de cero al máximo o del máximo a cero, ya que —según se aprecia en la ilustración de la página 3-60— el tiempo que la corriente tarda en alcanzar su máximo o disminuir a cero es igual a cinco veces la constante de tiempo.

corrientes en aumento y en descenso



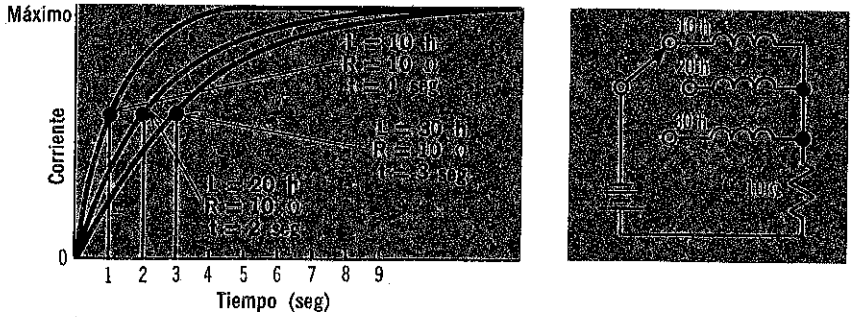
En cada constante de tiempo, la corriente aumenta a un valor que se acerca al 63.2% más a su valor máximo



En cada constante de tiempo, la corriente disminuye a un valor que se acerca a 63.2% más a cero

aumento y disminución de la inductancia y sus efectos

La cantidad de inductancia en un circuito de c-c determina *cuánto tiempo* tarda la corriente en alcanzar su valor máximo cuando se cierra el circuito, así como cuánto tiempo tarda la corriente en descender hasta cero cuando se abre el circuito. Si no hay inductancia en el circuito, las variaciones de corriente, desde el punto de vista práctico, son *instantáneas*. El efecto que produce el aumentar inductancia es originar un re-



El aumento de inductancia en un circuito de c-a hace que aumente la constante de tiempo en el circuito; y, por lo tanto, aumenta el tiempo que requiere la corriente para cambiar entre sus valores cero y máximo

traso en el tiempo que la corriente *tarda* en variar. Cuanta mayor inductancia se agregue, más tardará la corriente en variar. La relación exacta entre la inductancia y el tiempo necesario para variar se obtiene mediante la ecuación de la constante inductiva de tiempo, t = L/R. Por ejemplo, si la resistencia de un circuito es 10 ohms y la inductancia 2 henrys, la constante de tiempo del circuito es la siguiente.

$$t = L/R = 2 \text{ henrys}/10 \text{ ohms} = 0.2 \text{ segundos}$$

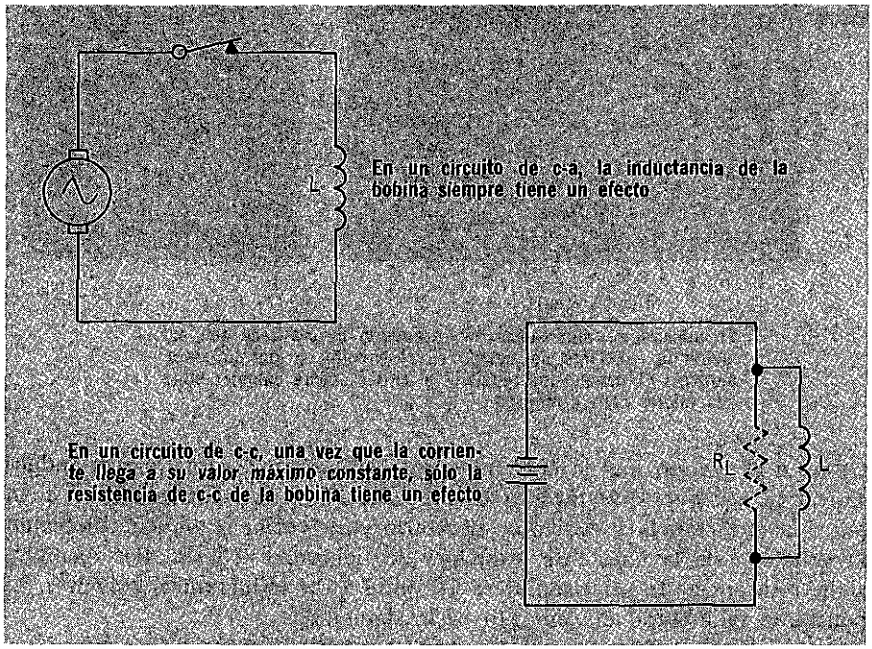
En virtud de que la corriente cambia de cero a máximo, o viceversa, en 5 veces la constante de tiempo, se necesitan 5, 0.2 segundos, ó 1 segundo, para este cambio. Si la inductancia aumenta a 4 henrys, la constante de tiempo del circuito se vuelve

$$t = L/R = 4 \text{ henrys}/10 \text{ ohms} = 0.4 \text{ segundos}$$

Y 5 por la constante de tiempo es igual a 5, 0.4 segundos, ó 2 segundos. Así, pues, al duplicar la inductancia se duplica también el tiempo que tarda la corriente variar entre sus dos valores. En forma similar, si la inductancia se triplica, el tiempo también se triplicará. Y si la inductancia se corta a la mitad. también el tiempo se reducirá a la mitad.

circuitos inductivos de c-a

A diferencia de un circuito de c-c, en el cual la corriente cambia solamente cuando se abre y se cierra el circuito, en un circuito de c-a la corriente cambia *frecuentemente*. En el caso de *c-a de tipo sinusoidal* la corriente cambia casi constantemente, ya que su magnitud varía en forma continua e invierte su dirección periódicamente. Puesto que éste es el tipo más común de c-a, lo que resta del presente volumen está dedicado al estudio de la c-a que varía como onda sinusoidal, excepto cuando se indique otra cosa.



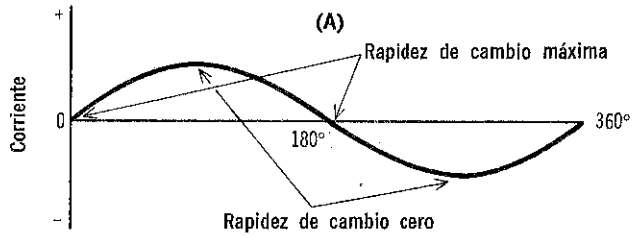
La inductancia afecta el funcionamiento de circuitos de c-c pura sólo en el instante en que son abiertos y en el instante en que se cierran. Por otra parte, en un circuito de c-a, la corriente siempre está variando y la inductancia se opone a tal variación. Por lo tanto, la inductancia tiene un efecto *constante* en el funcionamiento del circuito. De esta manera, desde el instante en que se cierra el interruptor del circuito hasta que se abre nuevamente, la inductancia afecta el funcionamiento del circuito.

El circuito ilustrado tiene sólo inductancia. En realidad, esto no puede suceder nunca, ya que la fuente, los conductores de conexión y el inductor, deben tener todos, algo de resistencia. Sin embargo, si estas resistencias son muy pequeñas y tienen un efecto mucho menor en la corriente del circuito que el que tiene la inductancia, se puede considerar que el circuito sólo tiene inductancia.

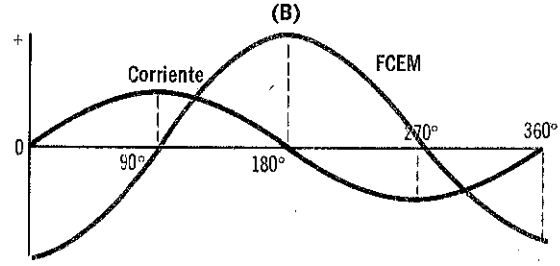
relaciones de tensión y corriente alterna

En todo circuito de c-a que tenga sólo inductancia, hay tres cantidades variables con las cuales normalmente se habrá de tratar. Estas son 1) la tensión aplicada, 2) la fcem inducida y 3) la corriente del circuito. Téngase presente que si un circuito de c-a sólo tiene *resistencia*, entonces la tensión y la corriente del circuito están en fase. Si el circuito tiene inductancia en lugar de resistencia, lo anterior no es válido. La fcem inducida y el retardo originados por la inductancia alteran la relación que hay entre la tensión aplicada y la corriente del circuito, que ya no estarán en fase, es decir, quedarán defasadas. Además, la fcem inducida está defasada con respecto a la tensión y a la corriente.

Las relaciones de fase en una inductancia se pueden comprender más fácilmente si antes se consideran la corriente y la fcem inducida. Para esto, se conocen dos características de la corriente y la fcem inducida. Una es que la fcem es máxima cuando la *rapidez de cambio* de la corriente es máxima y cero cuando la corriente no cambia. La razón es que cuando la corriente cambia rápidamente, las líneas de flujo se expanden o se contraen rápidamente de manera que hay un mayor movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. La segunda relación consiste en que la dirección de la fcem es tal que siempre se opone al cambio de la corriente.

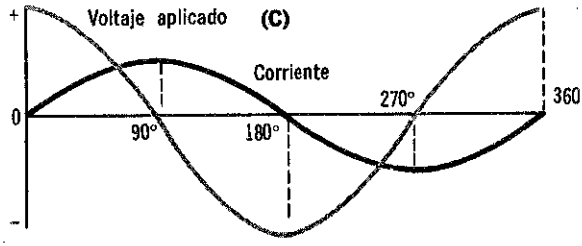


ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
"ACERVO"

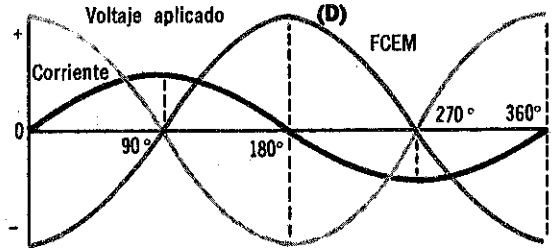


relaciones de tensión y corriente alterna (cont.)

La onda A de la página 3-63 muestra un ciclo de corriente alterna. La rapidez de la variación es mayor cuando la pendiente de la onda es máxima. Obsérvese que esto ocurre en aquellos puntos en que la onda pasa por cero, o sea en 0, 180 y 360 grados. Esto significa que la fcem mayor degenera en 0, 180 y 360 grados, como lo muestran las formas de onda de B, en la página 3-63. Cerca de 90 y 270 grados, la corriente varía muy poco; de hecho, exactamente a los 90 y 270 grados, donde la corriente cambia de elevación a descenso, la corriente momentáneamente no varía. Por lo tanto, las líneas de flujo no cambian en esos



puntos y no se induce fcem. Puesto que a cero grados la corriente pasa por cero en dirección positiva, la fcem debe ser máxima en la dirección negativa, ya que siempre se opone al aumento en la corriente. En forma similar, cuando la corriente comienza a disminuir a los 90 grados, la



En una inductancia: 1) el voltaje aplicado está adelantado 90 grados con respecto a la corriente; 2) la fcem está atrasada 90 grados con respecto a la corriente; 3) el voltaje aplicado y la fcem están 180 grados defasados entre sí.

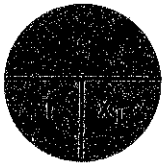
fcem debe aumentar en dirección positiva para facilitar el flujo de corriente. Por lo tanto, la fcem sigue *la ley de Lenz*, atrasándose 90 grados a la corriente. Se sabe que la tensión aplicada está defasada 180 grados con respecto a la fcem, de manera que la tensión aplicada debe estar adelantada 90 grados con respecto a la corriente. Esto se representa con las ondas en C, en esta misma página. Las relaciones entre las tres magnitudes (corriente, fcem y tensión aplicada) se representa con las ondas en D, en esta página.

reactancia inductiva

En un circuito de c-c al que se aplica tensión fija, la cantidad de corriente que fluye depende de la resistencia del circuito, la cual se opone al flujo de corriente. En un circuito de c-a que sólo tiene resistencia, ocurre lo mismo. Pero en un circuito de c-a que sólo tiene inductancia, la cantidad de corriente que fluye es determinada por la fcem que al oponerse al flujo de corriente contrarresta a la tensión aplicada. La fcem se comporta como resistencia para limitar el flujo de corriente. Pero la fcem se expresa en volts, de manera que no se puede usar en la ley de Ohm para calcular corriente. Sin embargo, el efecto de la fcem se puede expresar en ohms. A este efecto se le llama *reactancia inductiva* y se abrevia X_L. Puesto que la fcem generada por un inductor es determinada por la inductancia (L) de un inductor y la frecuencia (f) de la corriente, entonces la reactancia inductiva también debe depender de estos elementos. La reactancia inductiva se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$X_L = 2\pi fL$$

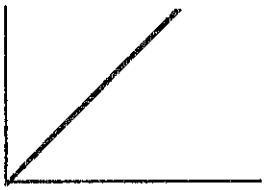
donde X_L es la reactancia inductiva expresada en ohms. El valor de 2π es aproximadamente 6.28; f es la frecuencia de la corriente en ciclos por segundo; y L es la inductancia expresada en henrys. La cantidad $2\pi f$ representa *la rapidez de cambio* de la corriente.



$X_L = 2\pi fL$

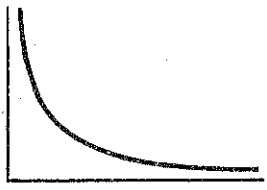
En un circuito puramente inductivo, la reactancia inductiva tiene el mismo efecto que el de la resistencia en un circuito c-c o en un circuito resistivo c-a

Se puede apreciar en la ecuación que cuanto más alta sea la frecuencia o mayor la inductancia, mayor será la reactancia inductiva. Igualmente, cuanto más baja sea la frecuencia o la inductancia, menor será la reactancia inductiva.



f o L

La reactancia inductiva cambia linealmente con la frecuencia y la inductancia



f o L

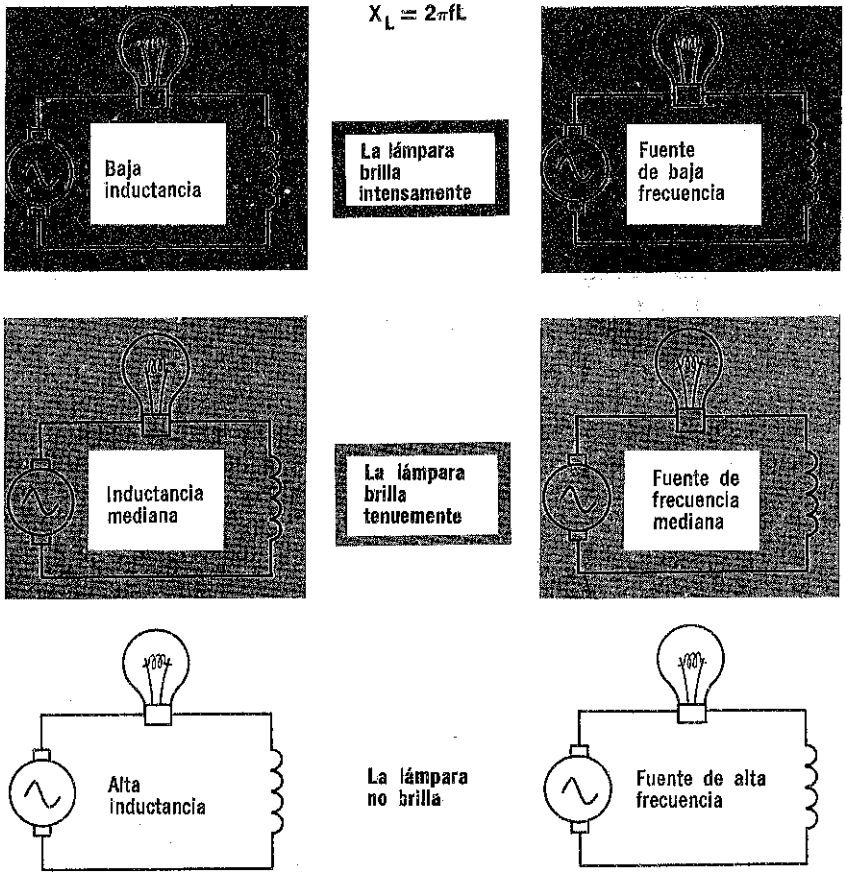
La corriente a través de una inductancia cambia con la frecuencia en forma no lineal

reactancia inductiva (cont.)

En un circuito de c-a que sólo tenga inductancia, la reactancia inductiva será lo único que limite al flujo de corriente. El cálculo de estos circuitos se puede hacer mediante la ley de Ohm con sólo usar la reactancia inductiva en lugar de la resistencia. Por lo tanto, $I = E/X_L$. Sin embargo, una diferencia importante es que un valor específico de reactancia inductiva se aplica sólo a una frecuencia específica. Así, si se calcula la reactancia inductiva del circuito para una frecuencia de 30 cps y luego se toma este valor para determinar la corriente de circuito, el resultado sólo será correcto si la frecuencia es constante. Si la frecuencia cambia, la reactancia inductiva cambiaría, lo mismo que la corriente del circuito. Como se sabe, si sólo hay resistencia, la frecuencia no tiene efecto sobre la resistencia básica.

La reactancia inductiva es directamente proporcional a la inductancia y a la frecuencia

$X_L = 2\pi fL$



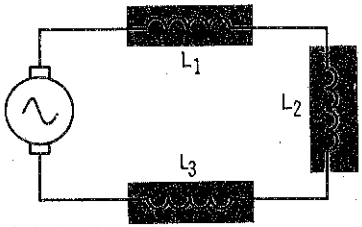
inductores en serie y paralelo

Para llenar los requisitos de los circuitos, a menudo es necesario conectar inductores en serie o en paralelo. Cuando se hace esto, la inductancia total se calcula exactamente *de la misma manera* que se calcula la *resistencia total* de resistores en serie y en paralelo. Para inductores en serie, esto significa que la inductancia total es igual a la *suma* de las *inductancias* de los inductores. En forma de ecuación, esto se expresa así:

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + \text{etc.}$$

Para inductores en paralelo, se pueden usar todos los métodos que se describieron en el volumen 2 para determinar la resistencia efectiva de resistencias en paralelo. El método general, que según se recordará, se aplica a todos los casos, es el *método recíproco*. Para inductores en paralelo, dicho método se expresa así:

$$L_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \text{etc.}}$$

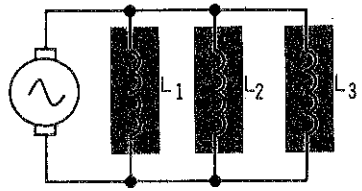


Inductancia total:

$L_{TOT} = L_1 + L_2 + L_3$

Reactancia inductiva total:

$X_{L\,TOT} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$



Inductancia total:

$$L_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}}$$

Reactancia inductiva total:

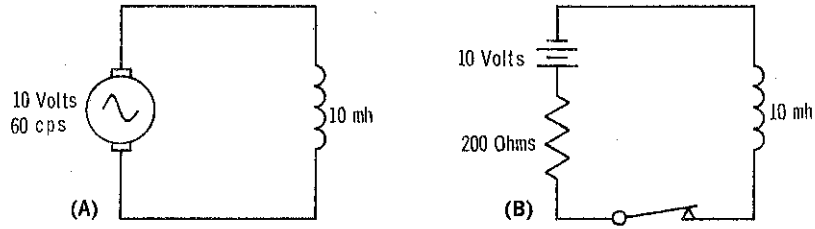
$$X_{L\,TOT} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}}}$$

La inductancia total o la reactancia inductiva de inductores en serie y en paralelo, se calcula de la misma manera que la resistencia total de combinaciones de resistencia serie y paralelo respectivamente.

Se puede determinar la reactancia inductiva total de combinaciones en serie y en paralelo de inductores mediante los mismos métodos que se han empleado para determinar la inductancia total. También se puede obtener la reactancia inductiva total determinando en primer lugar la inductancia total y luego calculando la reactancia inductiva de esta inductancia única.

Los métodos que se han descrito para encontrar la inductancia total de inductores en serie y en paralelo, se basan en la suposición de que estos últimos están colocados físicamente, de manera que las líneas de flujo de cada uno de ellos no corten los devanados de los otros inductores. El hecho de que las líneas de flujo de un inductor corten los devanados de otro se llama *inducción mutua*.

problemas resueltos



Problema 5. ¿En cuál de estos circuitos es más alta la corriente?

En el circuito B se aplica una tensión de 10 volts y la resistencia total de c-c del circuito es de 200 ohms. Teóricamente, una vez que la corriente ha alcanzado su valor máximo o de estado estacionario, el inductor no tiene efecto en la corriente continua. Por lo tanto, se puede considerar al inductor de 10-milihenrys como un corto circuito para la corriente continua ya que su resistencia es despreciable. La corriente en el circuito B se calcula simplemente por la ley de Ohm:

$$I = E/R = 10 \text{ volts}/200 \text{ ohms} = 0.05 \text{ ampere}$$

En la práctica, los inductores tienen efectivamente alguna resistencia a la c-c, ya que están construidos con espiras de alambre. Sin embargo, se puede considerar que un inductor de 10-mh presenta una resistencia a la c-c insignificante en el problema.

El circuito A es puramente inductivo, de manera que se puede usar la ley de Ohm para determinar la corriente mediante la reactancia inductiva del inductor en lugar de la resistencia. Antes que nada, pues, debe calcularse X_L:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 60 \text{ cps} \times 0.01 \text{ h} = 3.748 \text{ ohms}$$

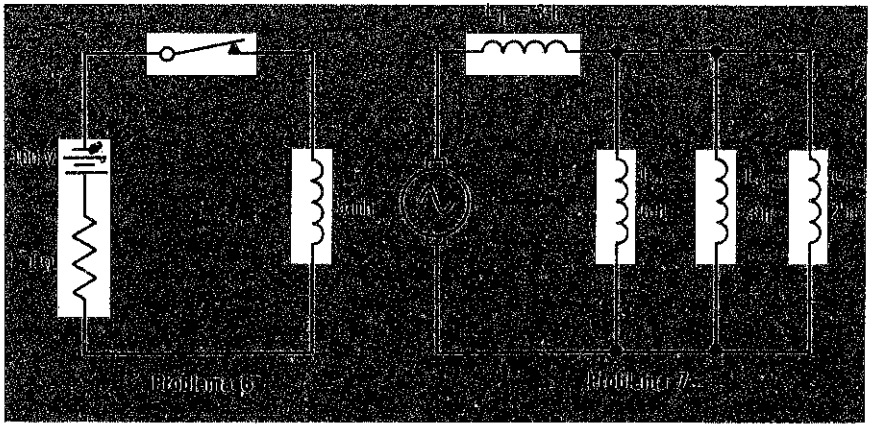
Note que el valor de la inductancia —de 10-mh— se ha convertido a la unidad básica de henry antes de resolver la ecuación. Esto siempre debe hacerse. Si se hubiera dado la frecuencia en kilociclos o megaciclos, también se hubiese necesitado convertirla a su unidad básica (cps).

Una vez que se conoce X_L se aplica la ley de Ohm para determinar la corriente del circuito. En realidad, puesto que se conocen la tensión aplicada a ambos circuitos y la oposición al flujo de corriente en ambos, cabe observar que fluirá más corriente en el circuito A que en el circuito B. Esto es obvio, ya que la ley de Ohm indica que para la misma tensión, ninguna resistencia permitirá el paso de mayor corriente. Si se deseara calcular la corriente en el circuito A, ésta sería:

$$I = E/X_L = 10 \text{ volts}/3.75 \text{ ohms} = 2.66 \text{ amperes}$$

En el problema anterior, se hizo la importante suposición de que los 10 volts dados para la tensión de la fuente del circuito A era un valor rcm. De otra suerte, la corriente en el circuito A no tendría relación con la corriente en B y, por lo tanto, no se podrían comparar las dos corrientes.

problemas resueltos (cont.)



Problema 6. ¿Cuánto tiempo tardará la corriente del circuito en alcanzar su valor máximo?

En cuanto se baja el interruptor, la corriente tardará un tiempo igual a 5 veces la constante de tiempo para llegar a su valor total. Una constante de tiempo t, es igual a la inductancia, en henrys, dividida entre la resistencia en ohms. Por lo tanto

$$t = L/R = 0.005 \text{ henry}/1 \text{ ohm} = 0.005 \text{ segundos}$$

por lo que

$$5t = 0.025 \text{ segundos}$$

Problema 7. ¿Cuál es la inductancia total del circuito?

Una combinación de inductancias en serie-paralelo se reduce a una inductancia única equivalente, igual que una combinación en serie-paralelo de resistencia se reduciría, aplicando el método recíproco.

$$L_{2-3-4} = \frac{1}{\frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{2}{6} + \frac{3}{6}} = \frac{1}{\frac{6}{6}} = 1 \text{ henry}$$

Esto reduce el circuito original a dos inductancias en serie. La inductancia total del circuito se encuentra ahora simplemente, sumando L_1 y L_{2-3-4}.

$$L_{TOT} = L_1 + L_{2-3-4} = 3 + 1 = 4 \text{ henrys}$$

Por lo tanto, la inductancia total de las cuatro inductancias en serie-paralelo es 4 henrys.

resumen

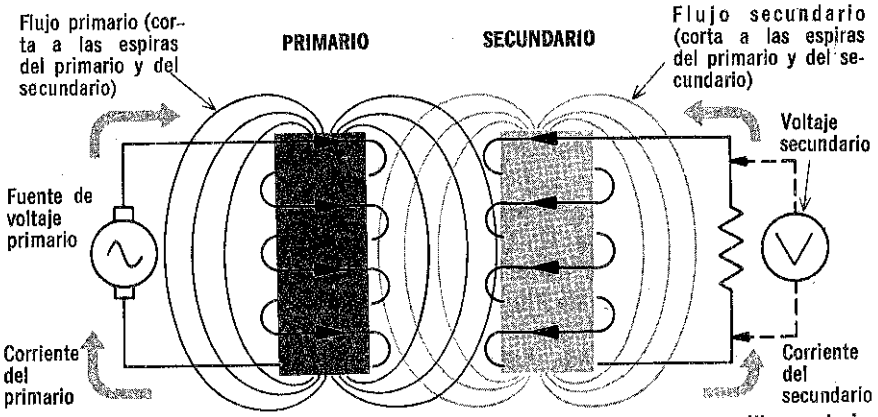
☐ La tensión de la fcem se puede calcular según: E_{fcem} = L × número de líneas de flujo, donde L es la inductancia del conductor. ☐ La inductancia es la propiedad de un circuito eléctrico que tiende a oponerse a cualquier cambio en la corriente del circuito. ☐ La inductancia se mide en henrys. Otras unidades son: el milihenry, mh, y el microhenry, μh. ☐ Los conductores embobinados que se insertan en un circuito para aumentar deliberadamente la inductancia se llaman inductores. ☐ Los inductores suelen llamarse "chokes" o bobinas. ☐ Se dice que una bobina está saturada cuando, aunque haya cambios grandes en la corriente, el flujo no aumenta más y se produce muy poca fcem.

☐ La fcem se puede calcular así: $fcem = -L(\Delta I/\Delta t)$. ☐ Cuando se coloca un inductor en un circuito de c-c, la corriente aumentará de acuerdo con una curva exponencial. La inversa es cierta cuando se abre el circuito. ☐ El tiempo requerido para que la corriente aumente a 63.2% de su valor máximo o disminuya al 63.2% de su valor máximo, se define como constante de tiempo.

☐ La constante de tiempo inductiva es igual a: $t = L/R$. ☐ El estado estacionario se alcanza después de cinco veces la constante de tiempo. ☐ La inductancia en un circuito de c-a tiene un efecto constante en la operación del circuito: la tensión aplicada está adelantada 90 grados con respecto a la corriente y la fcem atrasada 90 grados respecto a la corriente.

preguntas de repaso

1. Defina *constante de tiempo inductiva.*
2. ¿Cuánto tiempo, en relación con la constante de tiempo, se requiere para que la corriente llegue al 63.2% de su valor máximo en un circuito de c-c?
3. ¿En qué unidades se miden las constantes de tiempo?
4. ¿Cuál es la reactancia inductiva total de tres bobinas en serie si sus reactancias son 5, 5 y 10 ohms?
5. ¿Cuál sería la reactancia inductiva total para las bobinas de la pregunta 4 si estuviesen en paralelo?
6. ¿Cuál es la reactancia inductiva de una bobina de 10 milihenrys a frecuencias de 100 cps, 1,000 cps, 10 kc, 100 kc y 1 mc?
7. ¿Cuál es la relación de fase entre la corriente y la tensión en un inductor? ¿Por qué?
8. ¿Cuál es el valor de la constante de tiempo para un circuito que consta de un resistor de 5,000-ohms y una bobina con reactancia inductiva de 1,884 ohms, a 60 cps?
9. ¿Se requieren 10 segundos para que la corriente descienda a cero después de abrir el interruptor en un circuito de c-c que conste de una batería, interruptor, resistor y bobina? ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito?
10. Si el valor del resistor de la pregunta 9 es 100 ohms, ¿cuántos inductores de 40 henrys se necesitan para dar la inductancia? Estarán conectadas en serie o en paralelo?



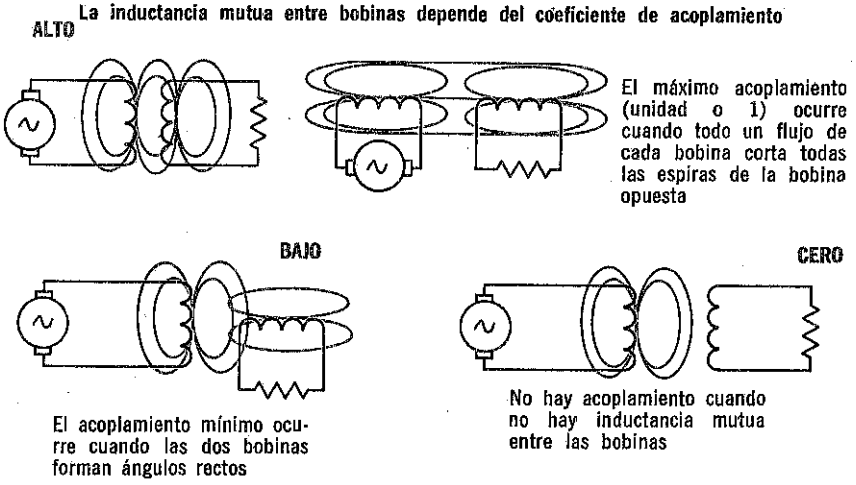
inducción mutua

La autoinducción en una bobina o conductor en realidad es una fuerza contraelectromotriz que se genera cuando el campo magnético originado por el flujo de corriente corta a la bobina o conductor. Si las líneas de flujo del campo magnético se expanden o contraen en una bobina cortarán los devanados de otra bobina cercana, también se induciría una tensión en esa segunda bobina. La magnitud de la fem inducida de esta manera depende de la *posición* relativa de las dos bobinas. Además, cuanto mayor sea el número de vueltas que tenga la segunda bobina y que sean cortadas por las líneas de flujo de la primera, mayor será la fem inducida. Esta inducción de fem en una bobina, o conductor por líneas de flujo generadas en otra bobina o conductor, recibe el nombre de *inducción mutua.* La bobina en la cual se origina el flujo se conoce como *primario*, o devanado primario, y aquella en la que se induce la fem recibe el nombre de *secundario.* En forma similar, la corriente que fluye a través del primario es la *corriente primaria* y si el secundario está conectado a una carga de manera que también fluya corriente, ésta recibe el nombre de *corriente secundaria.*

Cuando la corriente fluye en el devanado secundario, establece su propio campo magnético, que también induce una tensión en el devanado primario. Así pues, cuando hay inducción mutua entre dos bobinas, existen cuatro tensiones. Estas son: 1) la tensión aplicada al primario; 2) la fem autoinducida en el primario; 3) la fem inducida en el secundario; 4) la fem inducida de nuevo al primario por la corriente secundaria. Por lo tanto, la inductancia real o efectiva general de las dos bobinas mutuamente acopladas, es compleja debido a las interacciones complejas entre los campos magnéticos. La inductancia efectiva de dos bobinas acopladas mutuamente recibe el nombre de *inductancia mutua.*

inductancia mutua

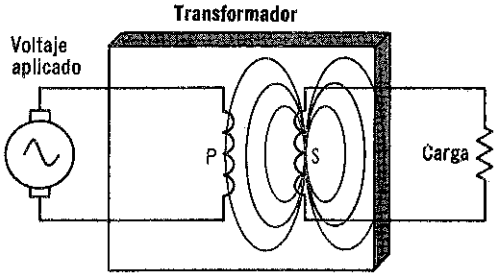
La inductancia mutua se puede considerar como la cantidad o grado de inducción mutua que existe entre dos bobinas o devanados. La inductancia mutua de dos bobinas determinadas depende del *encadenamiento de flujo* entre las bobinas, que a su vez dependen de las posiciones relativas que tiene entre sí. El grado de encadenamiento de flujo se expresa por medio de un factor que se llama *coeficiente de acoplamiento.* Cuando todas las líneas de flujo de cada bobina cortan o se concatenan con la otra, el coeficiente de acoplamiento es 1, que es el valor máximo. Si sólo algunas de las líneas de flujo de cada bobina cortan a la otra, el coeficiente de acoplamiento tiene un valor inferior a 1. Nótese que cuando no existe inductancia mutua entre dos bobinas, el coeficiente de acoplamiento entre ellas es cero. Cuando el coeficiente de acoplamiento se aproxima a 1, ambas bobinas tienen un acoplamiento estrecho; cuando el valor es mucho menor que 1, se dice que las bobinas tienen un acoplamiento flojo o débil. El término *acoplamiento crítico* se aplica para describir la línea divisoria entre un acoplamiento estrecho y débil.



Cuando se conoce el coeficiente de acoplamiento entre dos bobinas, la inductancia total de las bobinas se determina multiplicando los valores de inductancia de las bobinas, tomando la raíz cuadrada del resultado y multiplicándola por el coeficiente de acoplamiento. En forma de ecuación, esto puede escribirse así:

$$M = k \sqrt{L_1 \times L_2}$$

donde M es la inductancia total de las bobinas mutuamente acopladas, dada en henrys; k es el coeficiente de acoplamiento; y L_1 y L_2 son las inductancias de cada una de las bobinas expresadas en henrys.



En un transformador, la energía eléctrica se transforma del circuito primario al circuito secundario por medio de la inductancia mutua entre los devanados del transformador. La secuencia de esta transformación de energía es

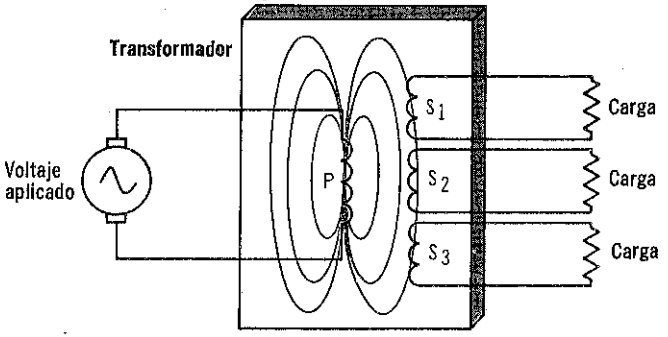
VOLTAJE APLICADO → CORRIENTE PRIMARIA → CAMPO MAGNETICO → FEM SECUNDARIA INDUCIDA → CORRIENTE SECUNDARIA → ENERGIA A LA CARGA

el transformador

Cuando hay inducción mutua entre dos bobinas o devanados, entonces un cambio de corriente en una de ellas induce una tensión en la otra. Los dispositivos que funcionan con base en este principio reciben el nombre de *transformadores*. Todo transformador tiene un devanado primario y uno o más devanados secundarios. El devanado primario recibe energía eléctrica de una fuente de energía y acopla esta energía al devanado secundario por medio de un cambio magnético variable. La energía aparece como una fem en el devanado secundario y si se conecta una carga al secundario, entonces la energía es transferida a la carga.

Por medio de transformadores, se puede transferir energía de un circuito a otro, sin que exista conexión física entre ellos. La transferencia de energía se efectúa completamente a través del campo magnético. Entonces el transformador funciona como dispositivo de acoplamiento. Los transformadores también son indispensables en la distribución de potencia de c-a ya que pueden convertir potencia eléctrica con condiciones dadas de corriente y tensión a la potencia equivalente, con otros valores de corriente y tensión.

Los transformadores pueden tener más de un devanado secundario

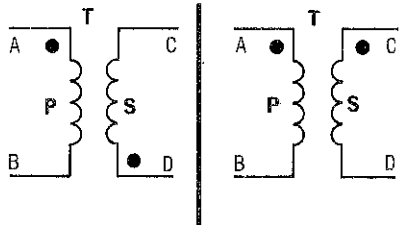


cómo funciona un transformador con secundario abierto

Se recordará que, cuando existe inducción mutua entre dos bobinas, no sólo la corriente del primario induce una tensión a la bobina secundaria, sino que la corriente resultante en la bobina secundaria, a su vez, induce una tensión *reflejada* en la bobina primaria. Esto ocurre en un transformador y en gran parte es la causa de la forma como trabaja el mismo. Sin embargo, para que esto se comprenda mejor, primero se describirá el funcionamiento del transformador en el caso de que tenga un *secundario abierto*. En este caso no hay corriente en el secundario, de modo que no hay tensión inducida en el primario. Después de la descripción de la forma en que trabaja un transformador con secundario abierto, se describirá un transformador completo, en el cual haya corriente tanto en el primario como en el secundario.

En un transformador con secundario abierto, el primario funciona esencialmente como un inductor. Esto significa que la corriente primaria está *atrasada* 90 grados con respecto a la tensión aplicada y al mismo tiempo está *adelantada* 90 grados a la fcem. Por lo tanto, la tensión aplicada y la fcem inducida son de polaridad *opuesta*. La mayor parte de los transformadores están diseñados para que tengan una elevada fcem inducida en el primario cuando se abre el secundario, de manera que la corriente primaria es *muy baja*. Como el campo magnético correspondiente al devanado primario y causado por la corriente variable en el primario, se origina y se contrae alternativamente, corta las espiras del devanado secundario, induciendo, en consecuencia, una tensión en el secundario. La tensión inducida en el secundario es *máxima* cuando la rapidez de *cambio* de la corriente primaria es máxima (0, 180 y 360 grados); es *cero* cuando la corriente primaria *no cambia* (90 y 270 grados). Cuando se representa gráficamente esta relación, como en la página 3-75, se puede apreciar que la tensión secundaria está atrasada 90 grados con respecto a la corriente primaria. Puesto que la tensión primaria aplicada está adelantada con respecto a la corriente primaria y, por lo tanto, la tensión secundaria está atrasada 180 grados con la tensión primaria. También está en fase con la fcem inducida en el primario.

Generalmente, la letra T designa un transformador, siendo P el primario y S el secundario o los secundarios



A veces, se usan puntos para indicar la terminal en fase de los dos devanados. Por sí solos, los símbolos esquemáticos no muestran relaciones de fase debido a que los conductores externos pueden estar invertidos para que la salida esté en fase con la entrada

tensión y corriente

RELACIONES DE FASE EN UN TRANSFORMADOR CON SECUNDARIO SIN CARGA

Voltaje aplicado al primario

- Adelantada 90 grados con respecto a la corriente primaria
- 180 grados defasados con la fcem
- 180 grados defasado con el voltaje secundario

Corriente primaria

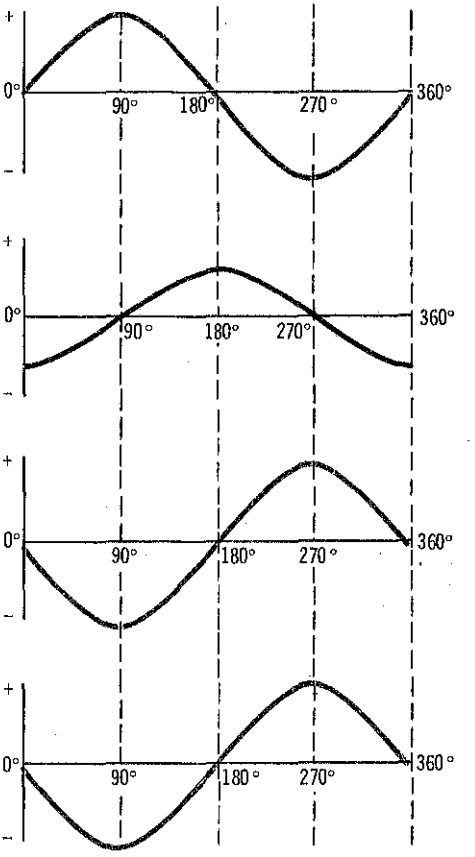
- Atrasada 90 grados con respecto al voltaje aplicado
- Adelantada 90 grados con respecto a la fcem
- Adelantada 90 grados con respecto al voltaje secundario

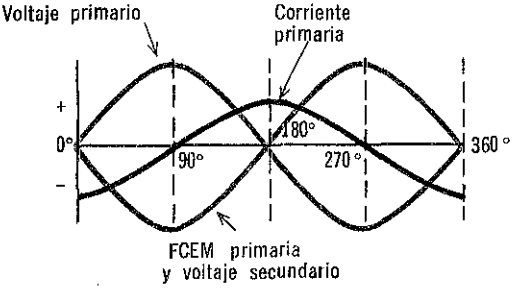
Fuerza contra electromotriz inducida en el primario

- Atrasada 90 grados con respecto a la corriente primaria
- Defasada 180 grados con respecto al voltaje aplicado
- En fase con el voltaje secundario

Voltaje secundario

- Atrasado 90 grados con respecto a la corriente primaria
- Defasado 180 grados con respecto al voltaje aplicado
- En fase con la fcem

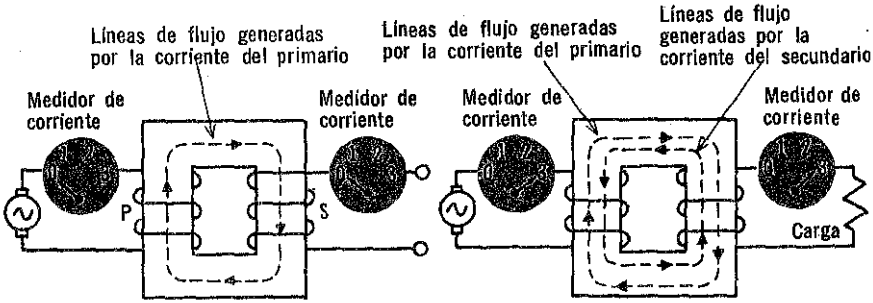




cómo funciona un transformador con secundario cargado

Cuando se conecta una *carga* al secundario de un transformador, hay corriente en el secundario. Como en cualquier inductancia, la *corriente* en el devanado secundario estará *atrasada* 90 grados con respecto a la *tensión* secundaria que la produce. Por lo tanto, puesto que la tensión secundaria, según se recordará, está atrasada 90 grados con respecto a la corriente primaria, y la corriente secundaria está atrasada 90 grados con respecto a la tensión secundaria, entonces la corriente secundaria estará defasada 180 grados con respecto a la corriente primaria. Al cambiar, la corriente secundaria genera su propio campo magnético, cuyas líneas de flujo *se oponen* a las del campo magnético originado por la corriente primaria. Esto *reduce* la intensidad del campo magnético

Cuando no fluye corriente en el secundario de un transformador, habrá muy poca corriente en el primario, pero, cuando hay corriente en el secundario, la corriente en el primario aumenta en proporción directa con la corriente del secundario

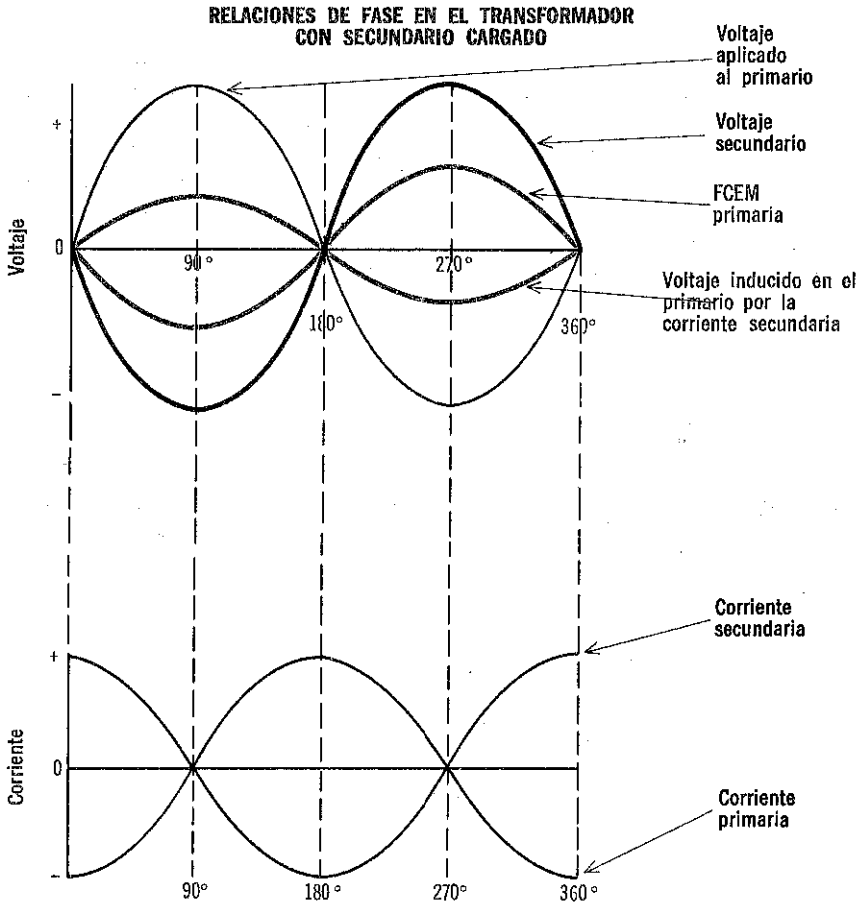


Con el secundario abierto, sólo existen las líneas de flujo causadas por el primario. La corriente primaria está limitada por la fcem, que normalmente es muy elevada

La corriente del secundario produce líneas de flujo que se oponen a las causadas por la corriente del primario, esto causa una disminución de la fcem y un aumento correspondiente en la corriente del primario

primario y, como resultado, la *fcem inducida es menor* en el primario. Con menos fcem inducida oponiéndose a la tensión aplicada, la corriente primaria *aumenta*. El grado del aumento está en *proporción directa* a la corriente que fluye en el secundario. Así, cuando aumenta la corriente secundaria en un transformador, la corriente primaria también aumenta automáticamente. Por otra parte, cuando disminuye la coriente secundaria, también lo hace la corriente primaria. De ahí, se puede apreciar que si el secundario de un transformador se conecta en *corto*, habrá demasiada corriente tanto en el primario como en el secundario. Entonces, no solamente se quemaría el transformador, sino que hay la posibilidad de que la fuente que alimenta potencia al primario también se dañe.

tensión y corriente

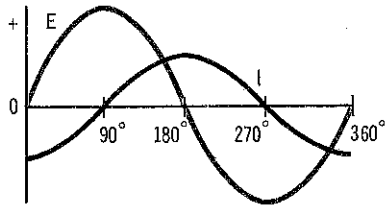


La corriente secundaria está defasada 180 grados con respecto a la corriente primaria. La corriente secundaria induce un voltaje en el primario, que se opone a la fcem del primario. Esto hace que la fcem del primario disminuya y permite el flujo de más corriente en el primario

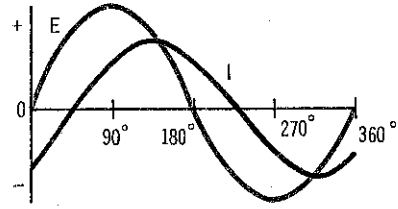
efecto que tiene la carga sobre las fases

La diferencia de fase de 90 grados (entre tensión y corriente, tanto en el primario como en el secundario) en realidad sólo existe cuando la corriente secundaria es muy pequeña. Cuando disminuye la resistencia de la carga secundaria, la corriente secundaria aumenta, lo cual se conoce generalmente como *aumento de la carga*. Esto hace que el circuito secundario se vuelva más resistivo. Con una carga más resistiva la diferencia de fase entre la tensión y la corriente se reduce, ya que están en fase cuando un circuito es puramente resistivo. Cuanto mayor sea la corriente secundaria, menor será el ángulo de fase.

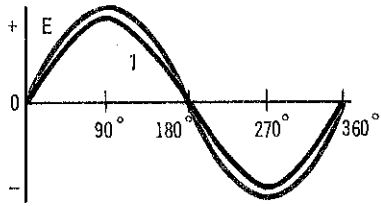
Corriente sin carga



Corriente con carga mediana



Corriente con carga intensa



Al aumentar la corriente secundaria, también en el primario se reduce la fcem inducida y será mayor la corriente primaria. Puesto que la fcem disminuye, la reactancia inductiva del primario se reduce. Por lo tanto, el circuito primario también se vuelve más resistivo al aumentar la corriente. Como resultado, el ángulo de fase entre la tensión primaria y la corriente también se reduce.

En resumen, cuando hay muy poca corriente en el secundario de un transformador que contenga una carga resistiva, la tensión y la corriente tanto en el primario como en el secundario están defasadas 90 grados. Pero al aumentar la carga en el secundario, se reduce el ángulo de fase entre la tensión y la corriente primarias y entre la tensión y la corriente secundarias (se aproxima a 0 grados). Esto se explica más detalladamente en el volumen 4.

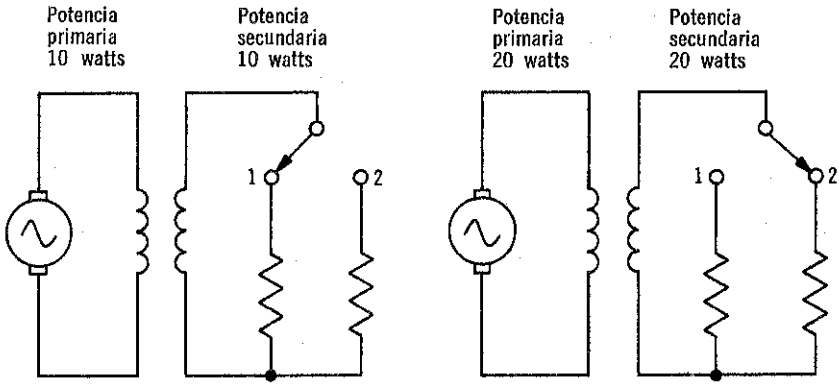
potencia primaria y secundaria

De hecho, un transformador transfiere *potencia* eléctrica del primario al circuito secundario. El circuito primario *toma* la potencia de la *fuente* y el secundario *transmite* la potencia a la *carga*. La potencia que es transferida del primario al secundario está determinada por la corriente del secundario que, a su vez, depende de la potencia que requiere la carga. Si la carga requiere una gran cantidad de potencia, según sería el caso de una carga de baja resistencia, entonces, se tendría mucha corriente en el secundario. Según se ha estudiado anteriormente, esta alta corriente causará una disminución en la fcem inducida del primario y la corriente primaria aumentará. Esto producirá el campo magnético más intenso, necesario para una alta corriente secundaria. Por lo tanto, el transformador regula la potencia transferida de la fuente a la carga en respuesta a lo que necesita la carga.

En un transformador *ideal*, la potencia en el circuito primario es igual a la potencia en el circuito secundario. Puesto que la potencia es igual al producto de la corriente por la tensión, la ecuación que determina la relación entre la potencia primaria (P_p) y la potencia secundaria (P_s) en un transformador ideal es la siguiente:

$$E_p \times I_p = E_s \times I_s$$

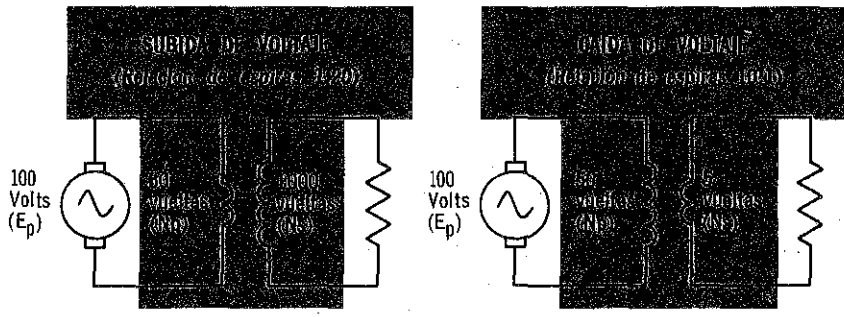
Así pues, suponiendo que las tensiones primaria y secundaria son iguales, como sucede cuando los transformadores del primario y el secundario tienen el *mismo* número de *vueltas*, la corriente primaria se ajustará automáticamente al mismo valor que la corriente secundaria, de manera que las potencias del primario y el secundario son iguales.



En un transformador ideal, la potencia en el circuito primario es igual a la potencia en el circuito secundario

relación existente entre espiras, tensión y corriente

Según se ha mencionado, una aplicación importante del transformador en transmisión de potencia es convertir potencia con unos valores de corriente y tensión, a *la misma potencia*, con *otros valores* de corriente y tensión. Básicamente, esto puede hacerse debido a que, con una tensión aplicada dada en el primario, la tensión secundaria depende del número de *espiras* del *devanado* secundario, comparado con el número de *espiras* del *devanado* primario. Cuando el devanado secundario tiene *más* espiras que el primario, la tensión secundaria es *mayor* que la tensión primaria. En este caso, ocurre un aumento de tensión y al transformador se le llama *transfomador elevador de tensión*. Asimismo, si el devanador secundario tiene *menor número* de espiras que el primario, la tensión secundaria será menor que la primaria y el transformador se llamará *transformador reductor de tensión*.



$E_S = E_p\,(N_S/N_p) = 100 \times (1000/50) = 2000$ volts

$E_S = E_p\,(N_S/N_p) = 100 \times (5/50) = 10$ volts

La razón de este aumento o disminución en tensión se comprenderá fácilmente si se recuerda que la tensión inducida en una bobina cualquiera es en realidad la suma de las muchas tensiones inducidas en cada espira cortada por las líneas de flujo. Por lo tanto, cuanto mayor número de espiras haya, mayor número de tensiones individuales se inducirán y mayor será su suma. En un transformador ideal la relación exacta entre las tensiones primaria y secundaria (E) y su número de espiras (N) se determina por la ecuación:

$$E_p/N_p = E_s/N_s \qquad \text{ó} \qquad E_p/E_s = N_p/N_s$$

por lo tanto, la tensión secundaria es igual:

$$E_s = E_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)$$

relación existente entre espiras, tensión y corriente (cont.)

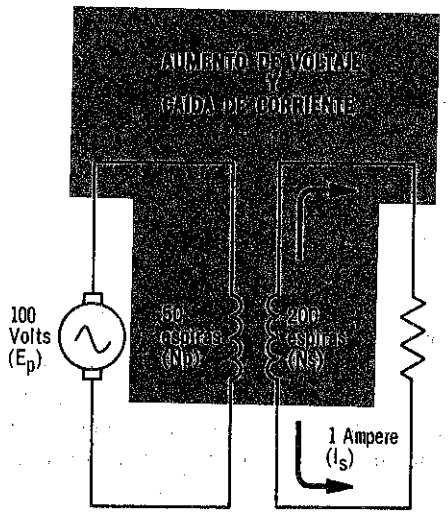
El número relativo de espiras en los devanados (N_p/N_s) recibe el nombre de *relación de espiras* del transformador y generalmente se expresa como una proporción: por ejemplo, 10:1, 50:1, 1:20, etc. Obsérvese en la ecuación, que si el secundario tiene *el doble* de espiras que el primario (relación de espiras de 1:2) la tensión secundaria es *el doble* de la *tensión primaria*. En forma similar, si el secundario tiene sólo *la mitad de espiras* que el primario (relación de espiras de 2:1), la tensión secundaria es de *la mitad* de la *tensión primaria.*

Puesto que la relación de espiras determina la relación entre las tensiones primaria y secundaria y puesto que, idealmente, la potencia del primario es igual a la potencia del secundario, entonces debe existir una relación entre la relación de espiras y las *corrientes* primaria y secundaria. Obsérvese en la ecuación de la potencia ($P = EI$) que, para que las potencias primaria y secundaria sean iguales, el devanado que tenga *tensión más alta* y, por lo tanto, mayor número de espiras, debe tener una *corriente más baja.* En forma similar, el devanado con *tensión más baja* y por lo tanto menor número de espiras, debe tener una *corriente más alta.* Esta relación entre las espiras y corrientes primaria y secundaria se expresa por medio de la ecuación:

$$I_p \times N_p = I_s \times N_s \qquad \text{ó} \qquad I_s/I_p = N_p/N_s$$

Por lo tanto, la corriente primaria será igual a:

$$I_p = I_s \left(\frac{N_p}{N_s}\right)$$



$I_p = I_S\ (N_S/N_p) = 1 \times (200/50) = 4$ amperes

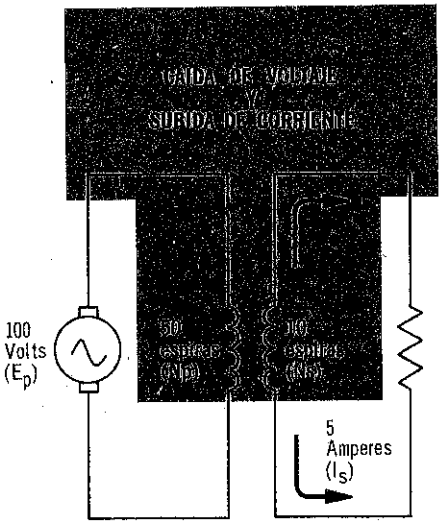
$E_S = E_p\ (N_S/N_p) = 100 \times (200/50) = 400$ volts

$P_p = E_p \times I_p = 100 \times 4 = 400$ watts

$P_S = E_S \times I_S = 400 \times 1 = 400$ watts

relación existente entre espiras, tensión y corriente (cont.)

La ecuación que expresa la relación entre las espiras y la corriente del primario, con respecto a las del secundario, indica que la corriente en el primario multiplicada por el número de espiras en el devanado primario es igual a la corriente en el secundario multiplicada por el número de espiras en el devanado secundario. La corriente multiplicada por el número de espiras suele conocerse con el término de *ampere-vueltas*. De manera que el número de ampere-vueltas del primario es igual al de ampere-vueltas del secundario.



$I_p = I_s (N_s/N_p) = 5 \times (10/50) = 1$ ampere

$E_s = E_p (N_s/N_p) = 100 \times (10/50) = 20$ volts

$P_p = E_p \times I_p = 100 \times 1 = 100$ watts

$P_s = E_s \times I_s = 20 \times 5 = 100$ watts

Si se comparan las relaciones que hay entre la relación de espiras y las tensiones y corrientes, tenemos:

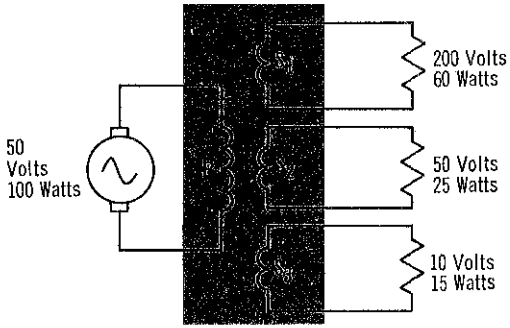
$$E_p/E_s = N_p/N_s$$

y

$$I_s/I_p = N_p/N_s$$

se puede apreciar que la relación de corrientes primario-secundario es *opuesta* a la relación de tensiones primario-secundario. Por lo tanto, un transformador con un aumento de 1:50 en tensión tiene una reducción de 50:1 en corriente. Obsérvese pues, que la potencia con una corriente y una tensión determinadas, se puede convertir a la misma potencia con cualquier otra corriente y tensión por medio de un transformador cuya relación de espiras sea adecuada.

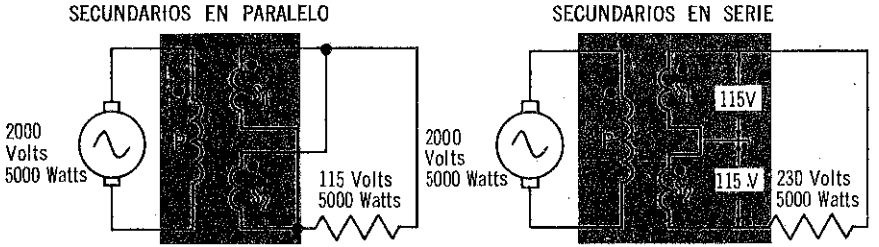
Devanados secundarios múltiples independientes



En transformadores con devanados secundarios múltiples, la potencia en el primario es igual a la suma de las potencias en los secundarios individuales:

$$P_P = P_{S_1} + P_{S_2} + P_{S_3} + \ldots + \text{etc.}$$

Devanados secundarios múltiples conectados a una carga común



transformadores de secundario multiple

Existe un tipo de transformador que tiene un *solo* devanado primario, pero *más de un* devanado secundario. Todos los devanados secundarios pueden ser devanados de bajada o de subida o bien unos de subida y otros de bajada. La tensión inducida en cada devanado secundario es *independiente de* los otros devanados y, como en cualquier transformador simple, la determina la tensión primaria y la relación del número de espiras del secundario con respecto a las del primario.

En algunas aplicaciones, los devanados secundarios se conectan a cada uno de los circuitos independientes. Sin embargo, en la transmisión de potencia eléctrica es común emplear transformadores con dos secundarios y conectar los devanados secundarios ya sea en serie o en paralelo. Entonces ambos secundarios transmiten potencia a la misma carga. Cuando los devanados están conectados en serie, si sus polaridades tienen la misma dirección entonces sus tensiones se suman; conduce la misma corriente. Si sus polaridades se oponen, sus tensiones se sustraen. Los devanados secundarios generalmente se conectan en paralelo de manera que pueda alimentarse una mayor corriente a una carga, con menos pérdidas.

resumen

☐ La inducción mutua se produce entre dos bobinas, cuando las líneas de flujo generadas en una bobina cortan a las espiras de la otra. ☐ La inducción mutua entre dos bobinas se obtiene por: $M = k\sqrt{L_1 L_2}$. ☐ Los transformadores aprovechan el fenómeno de la inductancia mutua entre dos bobinas o devanados. ☐ Con un secundario abierto, la tensión secundaria del transformador está defasada 180 grados con respecto a la tensión primaria y está en fase con la fuerza contraelectromotriz del primario. ☐ Cuando se conecta una carga al secundario de un transformador, fluye corriente en el secundario. A su vez, la corriente secundaria origina un campo magnético que induce una fcem en el primario. ☐ La conexión en corto del secundario puede causar que el primario tome corriente excesiva, lo cual puede dañar al transformador.

☐ El valor de la carga secundaria tiene efecto sobre los ángulos de fase entre tensión y corriente primarios y entre tensión y corriente secundarios. ☐ En un transformador ideal, la potencia en el primario es igual a la potencia en el secundario. ☒ La relación que existe entre el número de espiras en el primario y el número de espiras en el secundario recibe el nombre de relación de espiras o de vueltas. ☐ La relación de la tensión primaria a la secundaria es igual a la relación de espiras.

☐ La relación de la corriente secundaria a la primaria es igual a la relación de espiras. ☐ La cantidad de ampere-vueltas del primario es igual a la de ampere-vueltas del secundario. ☐ En transformadores de secundario múltiple, la potencia total en el primario es igual a la suma de las potencias de los secundarios.

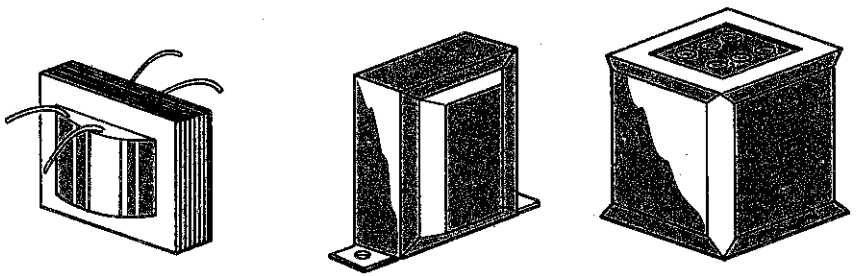
preguntas de repaso

1. ¿Qué es *inducción mutua*? ¿Cuáles son sus unidades?
2. ¿Qué significa *coeficiente de acoplamiento*?
3. ¿Cuál es la inductancia mutua de dos bobinas, cada una con una inductancia de 14 milihenrys, cuando el coeficiente de acoplamiento es 0?, ¿¼?, ¿½?, ¿¾?, ¿1?
4. ¿Qué es un *transformador?*
5. ¿Cuál es la *relación de espiras* de un transformador?
6. ¿Cuál es la relación de fase entre las tensiones primaria y secundaria de un transformador con un secundario en circuito abierto?
7. En un transformador ideal, ¿cuál es la relación entre la potencia del primario y la potencia producida por el secundario?
8. La tensión primaria de un transformador con una relación de espiras de 1:9 es 120 volts. ¿Cuál es la tensión en el secundario?
9. Un transformador cuyo primario toma 2,000 watts tiene cinco secundarios iguales. ¿Cuánta potencia se produce en cada secundario?
10. ¿Qué significa el término *ampere-vueltas*?

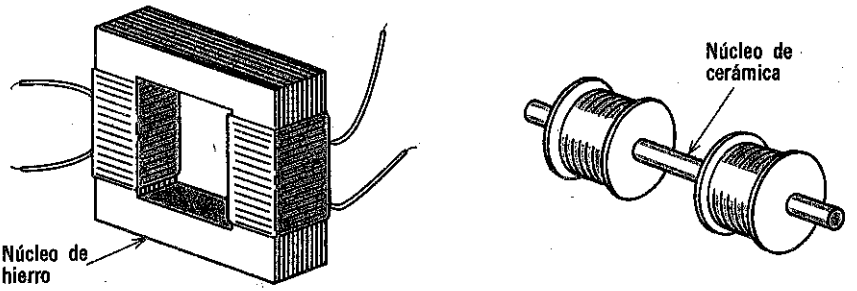
tipos de transformadores

Existen muchos tipos de transformadores que se emplean actualmente. Cada tipo de transformador está diseñado y, por lo tanto, se adapta mejor a determinada aplicación. Varían no solamente en características físicas, como tamaño y forma, sino también en características eléctricas y eficiencia. Una descripción completa de todos los diversos tipos de transformadores que se emplean queda fuera del área cubierta en este volumen. Sin embargo, existen ciertas categorías básicas dentro de las cuales pueden clasificarse todos los transformadores. Estas categorías se describirán en la página siguiente.

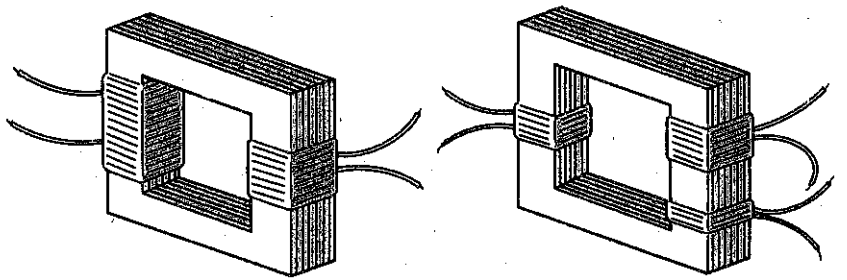
LOS TRANSFORMADORES VARIAN EN TAMAÑO Y FORMA



LOS TRANSFORMADORES VARIAN EN CUANTO AL MATERIAL DE SU NUCLEO

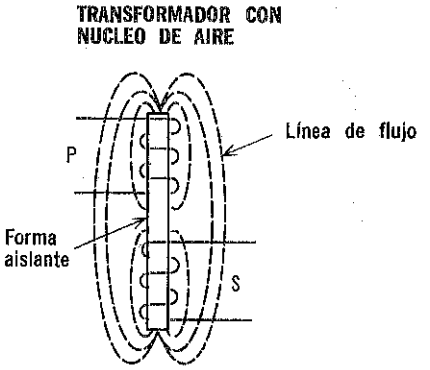


LOS TRANSFORMADORES VARIAN EN RELACION DE SUS VUELTAS

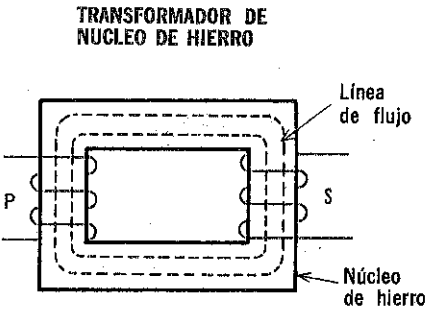


transformadores de núcleo de hierro y de núcleo de aire

Las dos categorías más amplias en que se pueden clasificar los transformadores son *transformadores de núcleo de hierro* y *de núcleo de aire.* Los nombres se derivan de los materiales que se encuentran entre los devanados primario y secundario, y a través de los cuales viajan las líneas de flujo. Los devanados de los transformadores de núcleo de aire se colocan alrededor de piezas *aislantes* y las líneas de flujo siguen una trayectoria en el *aire* que hay entre los devanados. El aire no ofrece a las líneas de flujo una trayectoria tan buena como el hierro, de manera que el acoplamiento entre el primario y el secundario es inferior al que se obtiene cuando se emplea núcleo de hierro. El coeficiente de acopla-



Las líneas de flujo viajan a través del aire en transformadores de núcleo de aire



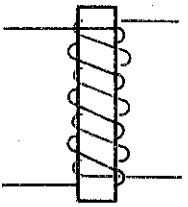
Las líneas de flujo viajan a través del hierro dulce o pulverizado en transformadores de núcleo ferroso

miento máximo posible con transformadores de núcleo de aire es del orden de 0.65, mucho menor que el de los transformadores de núcleo de hierro. En consecuencia, las relaciones simples primario-secundario no se aplican a transformadores de núcleo de aire, ya que estas fórmulas se basan en un acoplamiento casi perfecto. Esto se explica detalladamente en el capítulo de eficiencia de transformadores, que se estudia posteriormente. Por lo general, los transformadores de núcleo de aire sólo se usan a muy altas frecuencias, donde son imprácticos los transformadores de núcleo de hierro debido a las pérdidas que ocasionan.

transformadores de núcleo de hierro y de núcleo de aire (cont.)

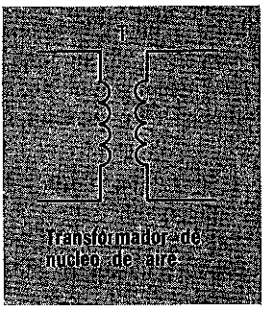
Los transformadores de núcleo de hierro generalmente tienen un núcleo hecho de hierro dulce o pulverizado. Los devanados están colocados alrededor del núcleo de hierro y las líneas de flujo se encuentran a través del núcleo entre los devanados. Las líneas de flujo hacen que el núcleo mismo se magnetice en la misma dirección, lo cual tiene como resultado un aumento considerable en el número total de líneas de flujo. Es posible un alto grado de acoplamiento con estos núcleos. Para lograr un mejor acoplamiento, a veces los devanados primario y secundario se devanan *superpuestos*. Se pueden obtener así coeficientes de acoplamiento tan altos como 0.98, en transformadores con núcleo de hierro. Estos altos coeficientes dan por resultado que los transformadores de núcleo de hierro tengan características aproximadas a las de un transformador ideal. Estos son los transformadores que se usan para la transmisión de potencia.

Hay un tipo de transformador en radio, en el cual se puede variar el acoplamiento. Esto se hace cambiando entre sí las posiciones de los devanados primario y secundario. Según se explicó anteriormente, cuando los devanados forman ángulos rectos entre sí, el acoplamiento es nulo. Cuando están paralelos, hay un acoplamiento máximo (1.00). En cualquier ángulo intermedio, se puede obtener cualquier grado de acoplamiento. Otro método para cambiar el acoplamiento es el pasar un blindaje magnético entre los devanados de un transformador de núcleo de aire.



Un método para aumentar el acoplamiento de un transformador es devanar el primario y el secundario alrededor del núcleo

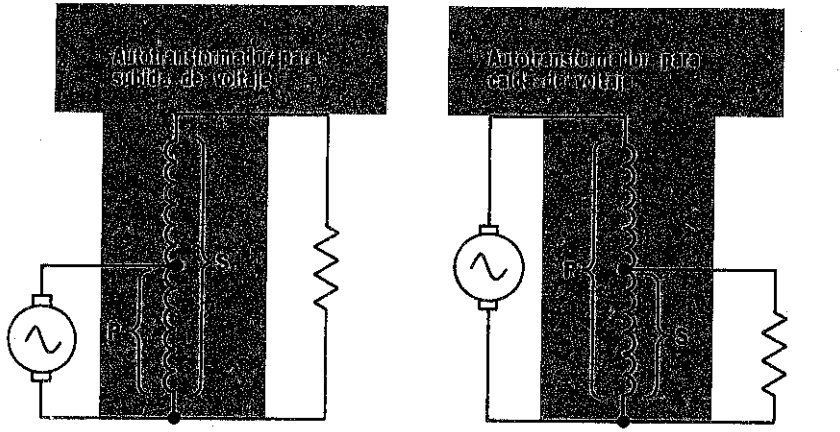
SIMBOLOS DE TRANSFORMADORES



el autotransformador

Existe un tipo especial de transformador con núcleo de hierro, que físicamente sólo tiene *un* devanado. Funcionalmente, sin embargo, este devanado sirve como primario *así como* secundario. Este tipo de transformador recibe el nombre de *autotransformador.* Cuando se usa un transformador para elevar la tensión, parte del devanado único actúa como primario y todo el devanado como secundario. Cuando se usa un autotransformador para reducir la tensión, todo el devanado actúa como primario y parte de él como secundario.

El devanado único de un autotransformador sirve tanto como primario cuanto como secundario



Cuando el voltaje aumenta, parte del devanado es el primario y todo el devanado es el secundario

Cuando cae el voltaje; todo el devanado actúa como primario y parte del devanado actúa como secundario

La acción de un autotransformador es básicamente la misma que la del transformador común de dos devanados. La potencia se transfiere del primario al secundario por medio del campo magnético cambiante, y el secundario, a su vez, regula la corriente del primario para establecer la condición necesaria de potencias iguales en el primario y el secundario. La cantidad de elevación o reducción en la tensión depende de la relación de espiras entre el primario y el secundario, considerando a cada devanado como separado, aunque algunas de las espiras sean *comunes* al primario y al secundario.

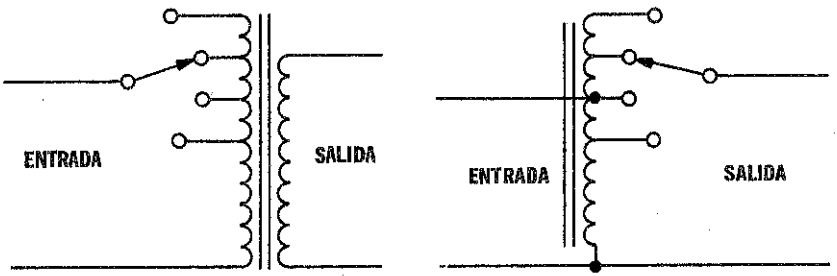
Una desventaja del transformador es la falta de *aislamiento* entre los circuitos primario y secundario. Esto resulta del hecho de que el primario y secundario usan mancomunadamente algunas de las espiras. A pesar de esta desventaja, el autotransformador se usa en muchos circuitos debido a su bajo costo.

el transformador ajustable

Los transformadores se pueden fabricar en forma semejante a los resistores variables, de manera que sus tensiones de salida se puedan ajustar a un valor específico. Estos transformadores se usan en reguladores de líneas de potencia, en donde es importante obtener una tensión exacta en la línea. Un transformador de este tipo consta generalmente de un contacto deslizante que puede colocarse en una posición tal en la que se obtenga la relación precisa de espiras para obtener la adecuada tensión de salida, cuando la tensión de entrada no tiene un valor muy preciso. Esto se puede hacer con un transformador común o bien con un autotransformador.

El voltaje de salida de cualquiera de estos transformadores se puede ajustar desde cero hasta algún valor máximo

Otro método para obtener la adecuada tensión de salida consta de un transformador especial que tiene un devanado con derivaciones. Las derivaciones pueden estar ya sea en el primario o en el secundario y con un interruptor selector, se establece la relación de espiras más conveniente. Pero este método no permite un control tan preciso como el transformador que tiene contacto deslizante. Sin embargo, se pueden hacer transformadores mediante una combinación de ambos métodos. Por ejemplo, un interruptor en un primario con derivaciones, para un ajuste *ligero*, y un contacto deslizante en el secundario para un ajuste *fino* o de *vernier*.



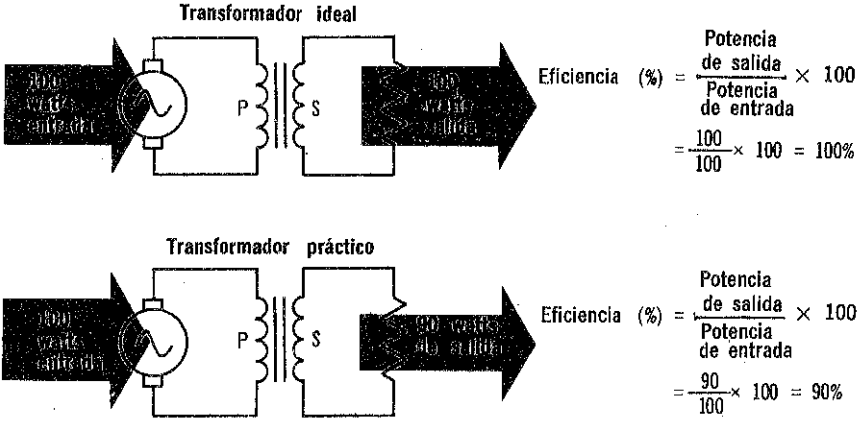
El voltaje de salida de cualquiera de estos transformadores se puede ajustar dentro de un rango definido, para acercarse al valor deseado

pérdidas en un transformador

Sabemos que en un transformador ideal, la potencia en el secundario es exactamente *igual* a la potencia en el primario. Esto ocurre en un transformador cuyo coeficiente de acoplamiento sea 1.0 (acoplamiento completo) y no tenga pérdidas internas. En la práctica, no puede hacerse un transformador así. El grado con que un transformador cualquiera se aproxime a estas condiciones ideales, recibe el nombre de *eficiencia* del transformador. Matemáticamente, la eficiencia es igual a la potencia de salida (secundaria) dividida entre la potencia de entrada (primaria). O sea:

$$\text{Eficiencia } (\%) = \frac{\text{potencia de entrada}}{\text{potencia de salida}} \times 100$$

Nótese en esta ecuación que, cuando las potencias de salida y de entrada son iguales, la eficiencia es cien por ciento. Cuanto menor sea la potencia de salida en relación con la potencia de entrada, menor será la eficiencia.

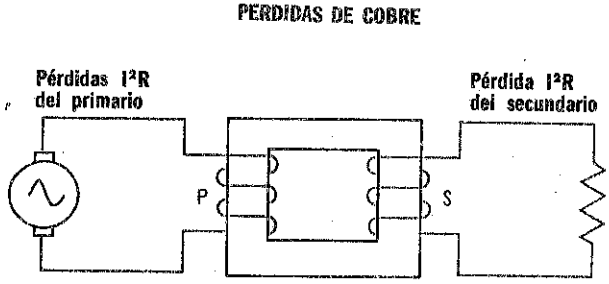


En cualquier transformador práctico, la potencia de salida es inferior a la potencia de entrada por lo que la eficiencia es menor que 100%. La potencia perdida o desperdiciada es el resultado de las pérdidas del transformador e inferior a un acoplamiento completo

Puesto que las pérdidas en un transformador reducen la eficiencia del mismo y, por lo tanto, representan potencia desperdiciada, estas pérdidas suelen mantenerse al mínimo. Esto ocurre especialmente en el diseño de transformadores de núcleo de hierro, los cuales deben transmitir grandes cantidades de potencia. El tipo más común de pérdidas en transformador se describe en las páginas siguientes.

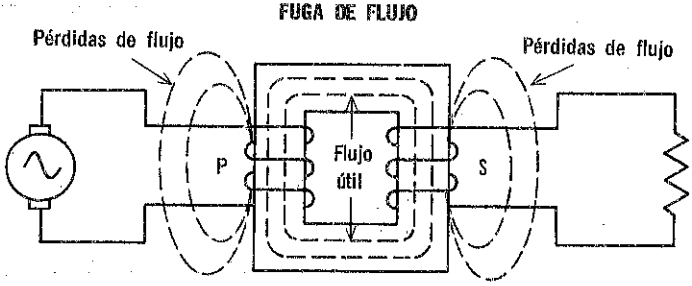
pérdidas en el cobre y fugas

Generalmente, los devanados de un transformador están hechos de muchas espiras de alambre de cobre. Igual que con cualquier alambre, estos devanados tienen *resistencia.* Cuantas *más espiras* tengan los devanados, mayor será la longitud necesaria del alambre y, por lo tanto, *mayor la resistencia.* Cuando las corrientes primaria y secundaria fluyen en los devanados, hay potencia *disipada* en forma de calor. Estas pérdidas I^2R se llaman *pérdidas en el cobre* y son proporcionales al cuadrado de la corriente y a la resistencia. Las pérdidas en el cobre pueden reducirse al mínimo devanando el primario y el secundario del transformador con alambre que tenga área transversal amplia; pero esto aumenta el tamaño y el peso del transformador.



Las pérdidas de cobre resultan de la resistencia del alambre usado para los devanados del transformador

Una causa de la ineficiencia en transformadores de núcleo de hierro es el hecho de que no todas las líneas de flujo producidas por los devanados primario y secundario pasan por el núcleo de hierro. Algunas de las líneas *se fugan* de los devanados al espacio y, por lo tanto, no unen al primario y al secundario. Esta fuga de líneas de flujo representa energía *desperdiciada.*

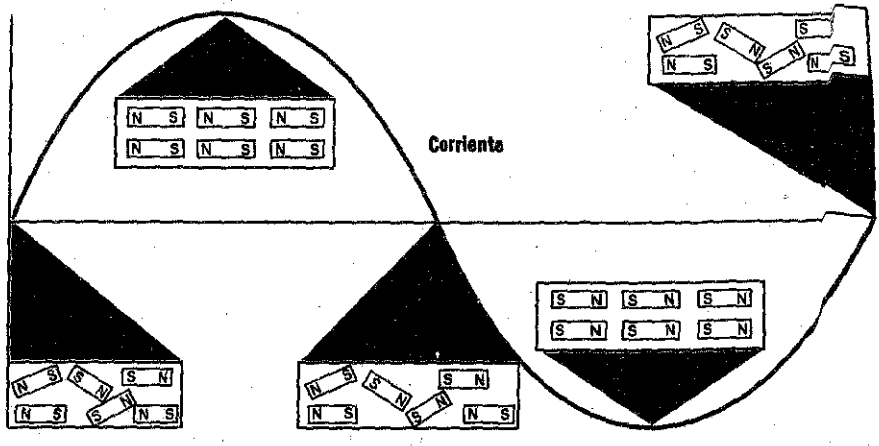


La fuga es causada por el hecho de que no todas las líneas de flujo circulan a través del núcleo de hierro

pérdidas por histéresis

En un transformador de núcleo de hierro, el núcleo es magnetizado por el campo magnético originado por la corriente de los devanados. La dirección de la magnetización del núcleo es la misma que la dirección del campo magnético que lo hace magnetizarse. Por lo tanto, cada vez que el campo magnético en los devanados se expande y se contrae, también cambia la dirección en que se magnetiza el núcleo. Se recordará de lo visto en el volumen 1, que cada molécula de hierro se comporta como un pequeño imán. Para magnetizar un trozo de hierro, todos o la mayor parte de estos pequeños imanes deben estar alineados *en la misma* dirección. Por lo tanto, cada vez que se invierte la dirección de magnetización del núcleo, las moléculas del núcleo giran para alinearse en la nueva dirección de las líneas de flujo. Sin embargo, las moléculas no siguen exactamente las inversiones del campo magnético.

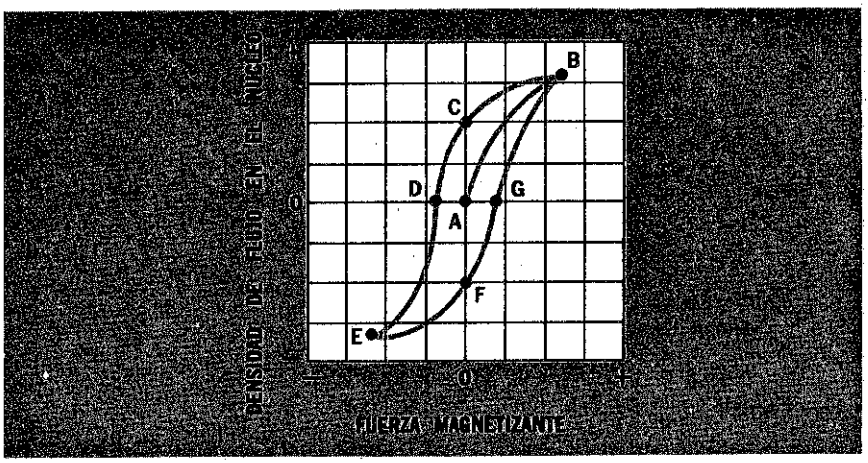
Cuando el núcleo está magnetizado inicialmente, las moléculas están alineadas en la dirección del campo. Pero cuando el campo magnético baja hasta cero, las moléculas no vuelven a sus orientaciones erráticas originales. Como resultado, aunque la fuerza magnetizante se ha reducido a cero, el núcleo retiene aún parte de su magnetización. El campo magnético tiene que invertir su dirección y aplicar una fuerza magnetizante en la dirección opuesta antes de que el núcleo regrese a su estado desmagnetizado. Entonces, las moléculas se invierten y se orientan en la nueva dirección del campo. El atraso de la orientación de las moléculas con respecto a la fuerza magnetizante, recibe el nombre de *histéresis*. La energía que debe alimentarse a las moléculas para que giren y traten realmente de alinearse con el campo magnético, recibe el nombre de *pérdida por histéresis del núcleo*. Cuanto más energía se necesite, mayor será la pérdida por histéresis.



ciclo de histéresis

Las pérdidas por histéresis dependen principalmente del tipo de material de que se componga el núcleo. Los materiales que mantienen gran parte de su magnetización después de que se ha retirado la fuerza magnetizante tienen grandes pérdidas por histéresis y se dice que tienen alta *permanencia.*

En un núcleo de determinado material, las pérdidas por histéresis son directamente proporcionales a la frecuencia de la corriente en el transformador. Mientras más alta sea la frecuencia, las moléculas del núcleo deberán invertir su alineamiento más veces por segundo; de manera que será mayor la energía necesaria para este fin. Esta relación entre pérdidas por histéresis y frecuencia es una de las razones principales por las que no pueden usarse transformadores con núcleo de hierro en aplicaciones de altas frecuencias.



Un ciclo de histéresis es una curva que indica la forma en que la magnetización de un material está atrasada con respecto a la fuerza magnetizante. Por lo tanto, se puede usar para indicar las pérdidas por histéresis. En la curva representada, el punto A corresponde a la ausencia de fuerza magnetizante y, por lo tanto, ausencia de flujo en el núcleo.

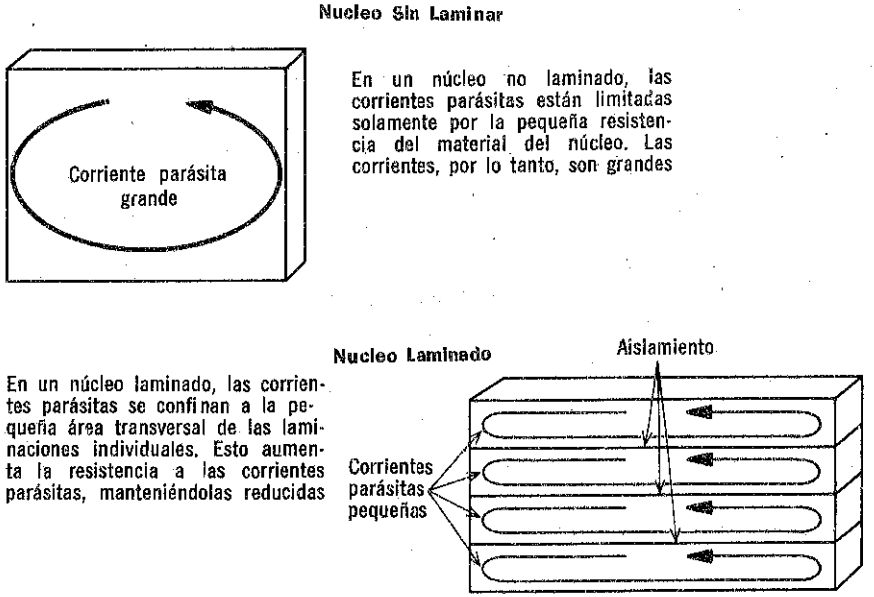
Cuando primero se aplica la fuerza magnetizante en la dirección positiva, la curva avanza al punto B, que corresponde a flujo de núcleo en la dirección positiva. Se puede ver que cuando la fuerza magnetizante se reduce a cero (punto C), en el núcleo aún hay flujo en la dirección positiva. La fuerza magnetizante tiene que invertir su dirección y llegar al punto D antes de que el material sea magnetizado (cero densidad de flujo).

Puede seguirse el resto del ciclo de la fuerza magnetizante (D a E) y completar un segundo ciclo (EFGBCDE) y se verá cómo la magnetización del núcleo está atrasada con respecto a la fuerza magnetizante.

pérdidas por corrientes parásitas

Puesto que el núcleo de hierro de un transformador es un material *conductor*, el campo magnético del transformador *induce* una tensión en el *núcleo*. Entonces esta tensión hace que circulen pequeñas *corrientes* dentro del núcleo. A estas corrientes se les llama *corrientes parásitas* o corrientes de remolino. Las corrientes parásitas se pueden considerar como corrientes de corto circuito, ya que la única resistencia que encuentran es la pequeña resistencia del material del núcleo. Igual que las pérdidas por histéresis las corrientes parásitas toman energía de los devanados del transformador, por lo que representan pérdidas de potencia.

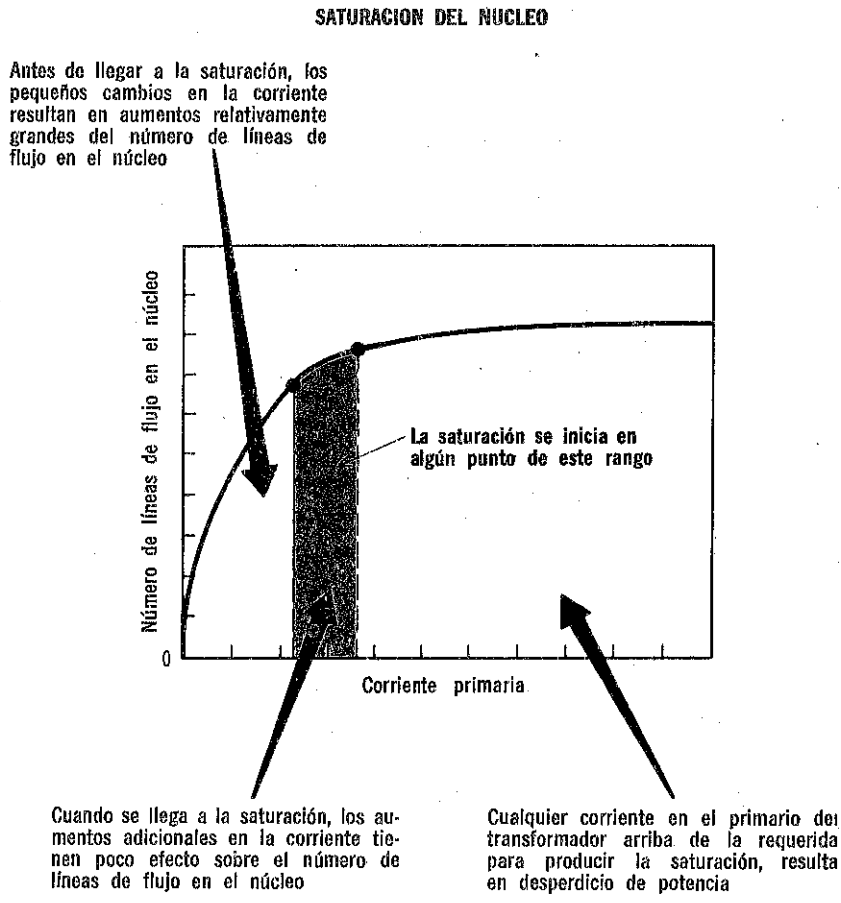
Las corrientes parásitas en un núcleo de transformador se reducen dividiendo el núcleo en muchas secciones planas o *laminaciones* y arreglando estas laminaciones entre sí por medio de un revestimiento aislante aplicado en ambos lados de la laminación. Entonces las corrientes parásitas sólo pueden circular en las laminaciones individuales. Por otra parte, puesto que las laminaciones tienen áreas transversales muy reducidas, la resistencia que ofrecen a las corrientes parásitas aumenta considerablemente.



La pérdida de potencia debida a corrientes parásitas es proporcional a la *frecuencia* y a la *magnitud* de la corriente en el transformador. Por tanto, las pérdidas de corriente, igual que las pérdidas por histéresis, limitan el uso de transformadores de núcleo de hierro a las aplicaciones de altas frecuencias.

pérdidas por saturación

Cuando la corriente aumenta en el primario de un transformador de núcleo de hierro, las líneas de flujo generadas siguen una trayectoria del núcleo al devanado secundario, regresando al devanado primario a través del propio núcleo. Cuando empieza a aumentar la corriente, el número de líneas de flujo en el núcleo aumenta *rápidamente*. Cuanto más se eleva la corriente, mayor es el número de líneas de flujo existentes en el núcleo. Cuando la corriente ha aumentado hasta el punto en que haya *gran número* de líneas de flujo en el núcleo (*alta densidad de flujo*), aumentar más la corriente sólo producirá otras *pocas* líneas de flujo. Entonces se dice que el núcleo está *saturado*. Todo aumento interior en la corriente primaria después de que se ha alcanzado la saturación en el núcleo, produce pérdida de potencia, ya que el campo magnético no puede acoplar la potencia adicional al secundario.



resumen

☐ Los transformadores de núcleo de aire están devanados sobre piezas aislantes y las líneas de flujo pasan por el aire, entre los devanados. ☐ El máximo coeficiente de acoplamiento posible para transfomadores de núcleo de aire es de 0.65. ☐ Los transformadores de núcleo de hierro tienen el núcleo de ese metal, el cual proporciona una mejor trayectoria para las líneas de flujo. ☐ El autotransformador sólo tiene un devanado, con una derivación. ☐ Una desventaja del autotransformador es que no tiene aislamiento entre los circuitos primario y secundario.

☐ Los transformadores variables tienen contactos deslizantes o derivaciones diferentes. Esto hace posible que el transformador tenga varias tensiones, según el lugar donde se ajuste el cursor deslizante o la derivación que se use. ☐ La eficiencia de un transformador indica la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada. ☐ La diferencia entre la potencia de entrada del transformador y la potencia de salida se debe a las pérdidas del transformador. ☐ Entre las pérdidas del transformador figuran pérdidas en el cobre, fugas, pérdidas por histéresis, corrientes parásitas y pérdidas por saturación.

☐ Las pérdidas en el cobre se deben al calor disipado en el devanado por el flujo de la corriente. A veces también se les llama pérdidas I^2R. ☐ La fuga se debe a que algunas de las líneas de flujo no unen al primario y al secundario simultáneamente. Esta fuga representa energía desperdiciada. ☐ Las pérdidas por histéresis dependen del tipo del material del núcleo empleado. Son directamente proporcionales a la frecuencia. Las pérdidas por corrientes parásitas se deben a corrientes circulantes o corrientes de corto circuito que fluyen en el material del núcleo. Estas pérdidas se reducen mediante laminaciones aisladas en el núcleo. ☐ Las pérdidas por saturación se deben a la incapacidad del material del núcleo para contener un número mayor de líneas de flujo al elevarse la corriente.

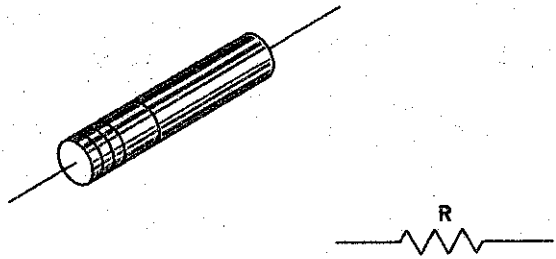
preguntas de repaso

1. ¿Cuántos devanados separados tiene un autotransformador?
2. ¿Tiene el autotransformador aislamiento entre el primario y el secundario? ¿Es esto una ventaja o una desventaja? ¿Por qué?
3. ¿Cuándo se usan transformadores de núcleo de hierro?
4. ¿Qué es un *transformador de núcleo de aire?*
5. ¿Qué se entiende por *eficiencia de un transformador*?
6. ¿Cuál es la eficiencia de un transformador ideal?
7. ¿Qué es un *ciclo de histéresis?* ¿Qué indica?
8. ¿Qué significa el término *pérdidas* I^2R en un transformador?
9. ¿Cuál es la diferencia entre *pérdidas por histéresis* y *pérdidas por corrientes parásitas* en un transformador?
10. ¿Qué significa *núcleo saturado*?

circuitos RL

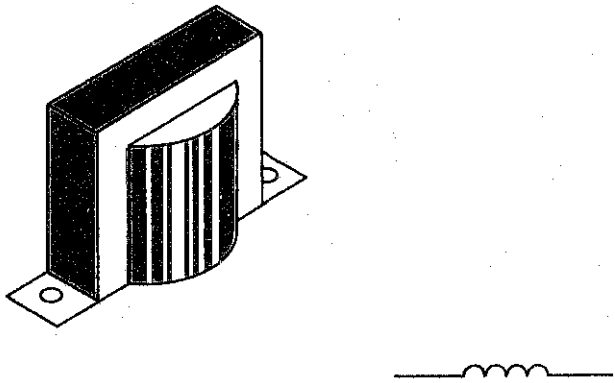
Hasta ahora, se ha descrito a la inductancia y a los componentes inductivos, de los circuitos —tales como inductores de capacitores— considerando los efectos que tienen en circuitos que *no* tienen resistencia. Sin embargo, en cualquier circuito siempre hay alguna resistencia, aunque sólo sea la de los conductores de conexión y los devanados del transformador o inductor. Cuando la resistencia del circuito es *muy baja* comparada con cualquier reactancia inductiva que haya, puede despreciarse la resistencia. Sin embargo, a menudo deliberadamente se agrega resistencia a un circuito que tiene inductancia. Entonces, tanto la resistencia como la reactancia tienen efecto en la corriente y deben considerarse en cualquier análisis que se haga de éste.

Los circuitos RL contienen resistores



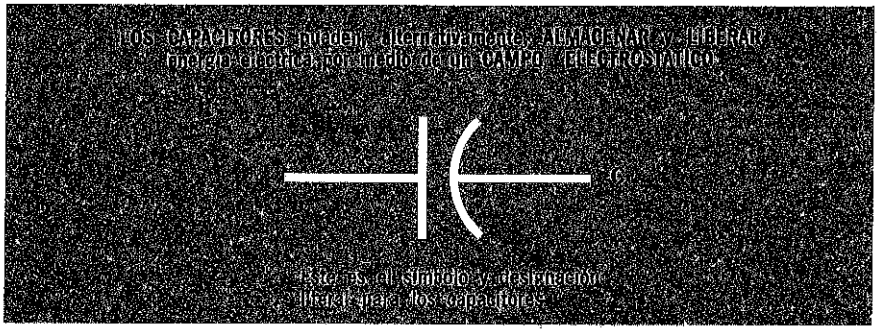
Los circuitos que contienen tanto resistencia (R) como inductancia (L) se llaman *circuitos RL*. Las relaciones entre la resistencia y la inductancia en circuitos RL y su efecto conjunto en el funcionamiento de circuitos se estudia en el volumen 4.

Los circuitos RL contienen inductores



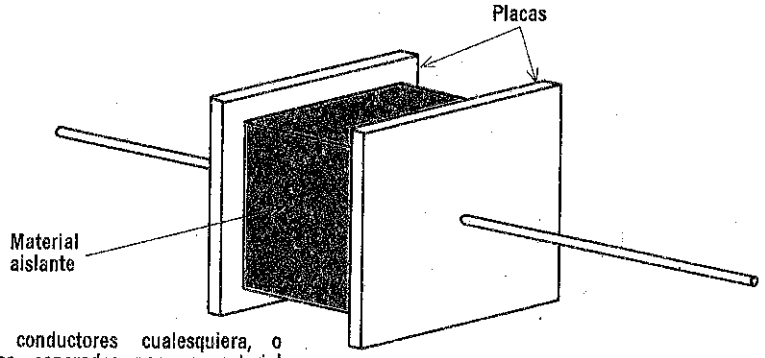
capacitancia y el capacitor

La capacitancia puede definirse en términos generales como la propiedad de un circuito eléctrico, que le permite almacenar energía eléctrica por medio de un *campo electrostático* y *liberar* esta energía posteriormente. Los dispositivos que introducen capacitancia a los circuitos se llaman *capacitores*. Físicamente, existe un capacitor siempre que un material *aislante* separe a *dos conductores* que tengan una diferencia de potencial entre sí. Los capacitores son aparatos fabricados para añadir deliberadamente capacitancia a un circuito. Sin embargo, la capacitancia



también puede ser una capacitancia adicional debida a la disposición y localización de partes en un circuito o sistema eléctrico. En este caso, la capacitancia que se introduce generalmente no es deseada. En un capacitor, la energía eléctrica se almacena en forma de campo electrostático entre los dos conductores o *placas*, como se les llama generalmente.

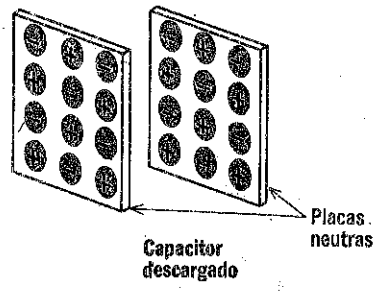
Los capacitores antiguamente se conocían como *condensadores* y, a veces, todavía se les llama así. Sin embargo, el término capacitor es más correcto.



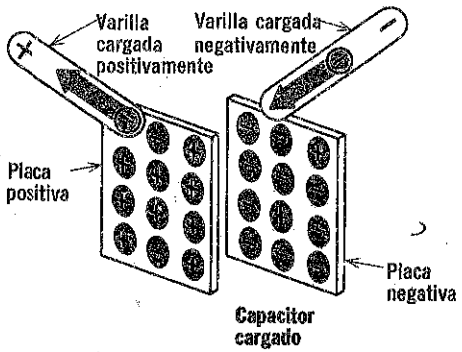
Dos conductores cualesquiera, o placas, separadas por un material aislante, pueden transformar un capacitor

carga de un capacitor

Cuando un capacitor tiene una diferencia de potencial entre sus placas, se dice que *está cargado*. Para producir una diferencia de potencial o, en otras palabras, para cargar el capacitor, se hace que los *electrones libres* se *acumulen* en una placa y al mismo tiempo se le *quitan* electrones libres de la otra placa. Por lo tanto, una placa tiene *exceso* de electrones libres y la otra tiene *defecto* de ellos. Puesto que los electrones son negativos, la placa que contiene electrones en exceso tiene una carga total *negativa* en tanto que la placa a la cual se le han quitado electrones tiene una carga total *positiva*. En consecuencia, existe una diferencia de potencial o tensión entre las placas. Esto se ilustra a continuación para el caso de un capacitor simple que tenga dos placas de metal separadas por aire, el cual sirve como aislante eléctrico. Antes de cargar el capacitor, ambas placas son eléctricamente *neutras*. Según se recordará de lo visto en el volumen 1, esto significa que tienen un *número igual* de cargas positivas (protones) y cargas negativas (electrones).



En un capacitor sin carga, ambas placas tienen un número igual de electrones y protones y, por lo tanto, son eléctricamente neutras



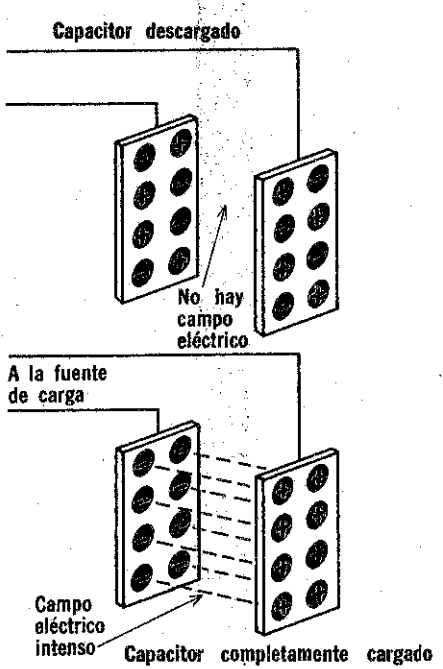
Cuando un capacitor se carga, una capa está provista de un exceso de electrones y por lo tanto está cargada negativamente, entretanto, los electrones son retirados de la otra placa, de manera que ésta queda cargada postivamente

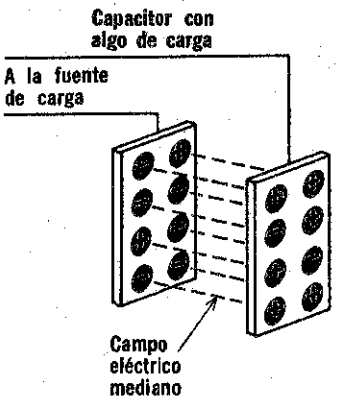
Cuando a un varilla de hule se la carga negativamente frotándola con un pedazo de piel y se la pone en contacto con una placa, los electrones de varilla pasan a la placa y ésta se carga negativamente, ya que le quedan más electrociprotones. Si al mismo tiempo, a una varilla de vidrio se la carga positivamente frotándola con seda y se la pone en contacto con la otra placa, la varilla atrae los electrones de la placa y ésta se carga positivamente, debido a que le quedan más protones que electrones.

Naturalmente, en los circuitos reales los capacitores no se cargan con varillas de hule y cristal, sino que se emplean fuentes de carga más prácticas, por ejemplo baterías y generadores.

el campo eléctrico

Cuando se carga un capacitor, una placa es negativa y la otra positiva. Puesto que los electrones son *atraídos* por un potencial *positivo*, los electrones en exceso de la placa negativa tenderían a moverse hacia la placa positiva, si no fuese por el hecho de que ambas placas están separadas por un material aislante. Aunque los electrones no pueden fluir hacia la placa positiva, la *fuerza electrostática* que los atrae sigue existiendo. A esta fuerza se le llama *campo eléctrico*, y se puede representar mediante líneas de fuerza eléctrica existentes entre las dos placas del capacitor. Cuanto más se cargue un capacitor, más intenso será el campo eléctrico. Al aumentar las cargas, también aumentan el campo eléctrico y la fuerza de atracción entre las placas. En la práctica, un capacitor se puede *sobrecargar* hasta el punto en que la atracción entre la placa positiva y la negativa sea tan grande que los electrones *atravesarán* el aislamiento hacia la placa positiva. Cuando esto sucede, se dice que el aislamiento ha *fallado* o que *se ha perforado*.



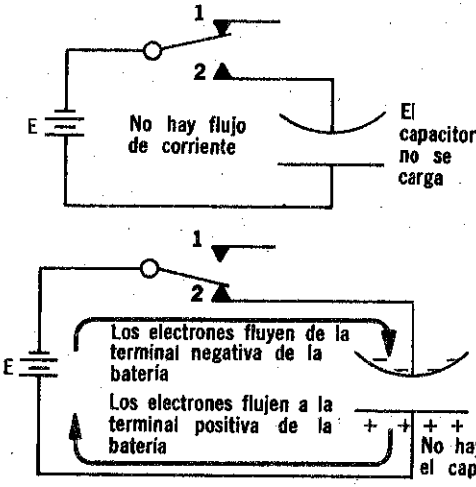


Al cargarse un capacitor, se establece un campo eléctrico entre las placas. Mientras más cargue el capacitor, más intenso es el campo eléctrico. La energía eléctrica almacenada por un capacitor está contenida en el campo eléctrico y se manifiesta como un voltaje entre las placas

El campo eléctrico entre las placas de un capacitor se puede considerar como *energía almacenada* y se manifiesta como una *tensión* entre dichas placas. La tensión se reducirá si se libera energía almacenada cuando se descarga el capacitor. Esto se estudia posteriormente.

cómo se carga un capacitor en un circuito de c-c

Para que un capacitor se cargue y, en consecuencia, almacene energía eléctrica, debe tener una diferencia de potencial o tensión aplicada a las placas. Si esta tensión es alimentada por una batería, se conecta una placa del capacitor a la terminal positiva de la batería y la otra placa a la terminal negativa. Si se coloca un interruptor en el circuito, como se indica, entonces no se aplicará tensión al capacitor en tanto el interruptor esté abierto. Consecuentemente, las placas del capacitor son neutras y no hay almacenamiento de energía.



Cuando se cierra el interruptor, los electrones fluyen de la terminal negativa de la batería, que tiene potencial negativo, a la placa del capacitor a la cual está conectada. Así, la placa adquiere un exceso de electrones o una carga negativa. Al mismo tiempo, la terminal positiva de la batería, que tiene un potencial positivo, atrae a un número igual de electrones de la placa del capacitor a la cual está conectada. Así, la placa queda con defecto de electrones, o sea, con una carga positiva.

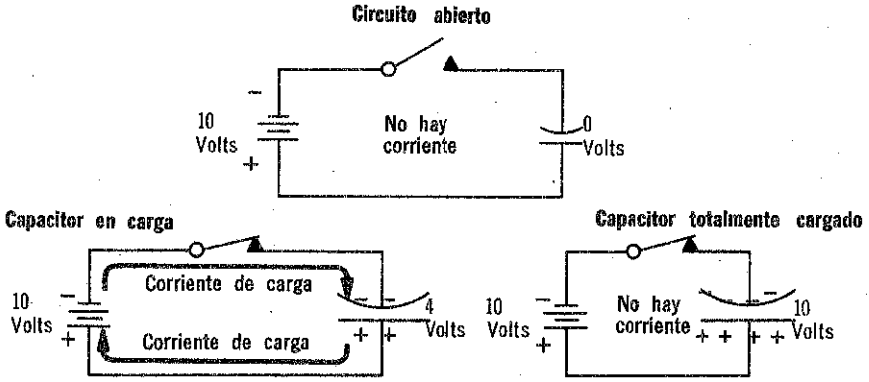
Mientras el capacitor se carga, los electrones fluyen a través de los conductores de circuito entrando y saliendo de la batería. En otras palabras, hay corriente en el circuito. Sin embargo, debe tenerse cuidado en observar que la corriente fluye en el circuito, no fluye a través del capacitor. La corriente entra al capacitor y sale de él; pero el aislamiento entre las placas del capacitor evita que haya corriente dentro del capacitor mismo.

cómo se carga un capacitor en un circuito de c-c (cont.)

Al fluir electrones hacia la placa negativa de un capacitor y salir de la placa positiva, el campo electrostático creciente origina una tensión en el capacitor. Cuando se cierra el circuito esta tensión comienza en cero y después aumenta al entrar cada vez más electrones a la placa negativa y salir un número igual de electrones de la placa positiva. La tensión originada en el capacitor tiene una polaridad que *se opone* a la de la batería que alimenta la corriente. Como resultado, la tensión en el capacitor *se opone* a la tensión de la batería. Por lo tanto, la tensión total del circuito consiste en dos tensiones *opuestas en serie.*

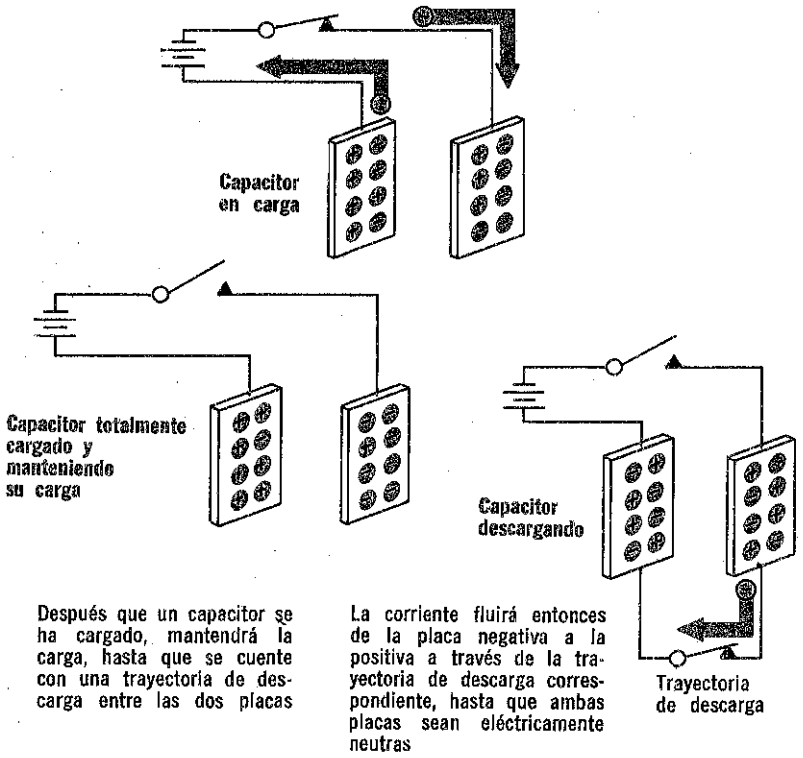
Al aumentar la tensión en el capacitor, disminuye la tensión *efectiva* del circuito, que es la *diferencia* entre la tensión de la batería y la tensión del capacitor. A su vez, esto ocasiona una disminución en la corriente del circuito. Cuando la tensión del capacitor *es igual* a la tensión de la batería, la tensión efectiva del circuito es nula por lo que cesa la corriente. En este punto, el capacitor está *totalmente* cargado y no puede haber más corriente en el circuito.

La corriente que fluye cuando el capacitor está cargándose recibe el nombre de *corriente de carga.* De hecho, se puede ver que la corriente de carga y la tensión en el capacitor se comportan de maneras *opuestas.* Cuando la carga se inicia, la corriente es máxima y la tensión del capacitor es nula. Y al aumentar la tensión en el capacitor, la corriente disminuye. Finalmente, cuando la tensión del capacitor llega a su valor máximo, la corriente es nula.



Un capacitor se carga hasta que el voltaje que se desarrolla en él es igual al voltaje aplicado. Cuando estos dos voltajes son iguales, el capacitor está totalmente cargado y entonces cesa la corriente

Por esta razón, un capacitor nunca puede cargarse a un voltaje superior al de la fuente que alimenta la corriente de carga



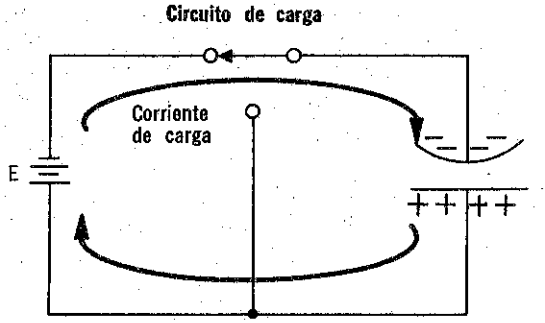
descarga de un capacitor

Una vez cargado un capacitor, teóricamente mantendrá indefinidamente su carga. Sin embargo, en la práctica, cuando un capacitor cargado se retira de la fuente de carga, *a la larga* pierde su carga. Sin embargo, esta pérdida de carga tarda cierto tiempo, de modo que, para aplicaciones prácticas en circuitos, se puede considerar que un capacitor mantiene su carga hasta que *deliberadamente* se le quite la energía eléctrica que almacena. La recuperación de esta energía se conoce como *descarga del capacitor.*

Para descargar un capacitor, todo lo que se requiere es una *trayectoria conductora* entre las placas del capacitor. Los electrones libres de la placa negativa fluirán entonces al potencial positivo de la placa positiva. De esta manera, la placa positiva adquiere electrones en número suficiente para neutralizarse eléctricamente. Asimismo, la placa negativa pierde electrones suficientes para neutralizarse también. Cuando ambas placas están neutras, el capacitor no tiene tensión en sus terminales y se dice que está descargado. El flujo de electrones de la placa negativa a la positiva durante la descarga constituye lo que se conoce como *corriente de descarga.* La trayectoria que sigue esta corriente se conoce como *trayectoria de descarga.*

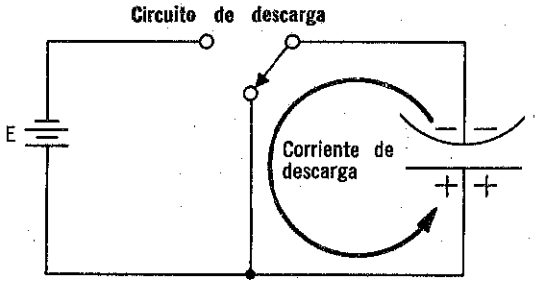
descarga de un capacitor en un circuito de c-c

Después de que se ha cargado un capacitor en un circuito de c-c al valor de la tensión de la fuente, la corriente deja de fluir en el circuito. Así, el circuito en realidad está *abierto* y permanece en estas condiciones hasta que el capacitor se descarga. El capacitor *no puede* descargarse a

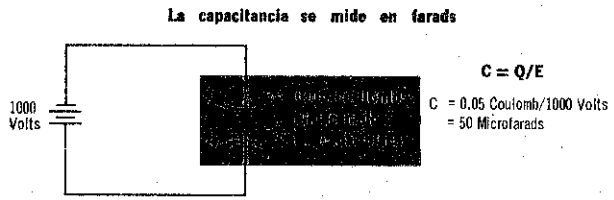


través de la fuente de energía, ya que la polaridad de la tensión de la fuente es tal que se opone a la tensión del capacitor. Por lo tanto, para que el capacitor se descargue, debe contarse con otra trayectoria de descarga.

Cuando se dispone de esta trayectoria, el capacitor se descargará *completamente* a través de ella. Durante la descarga, el capacitor y la trayectoria de descarga se pueden considerar como un circuito indepen-



diente, en el que el capacitor alimenta la tensión para el circuito. En el instante en que el capacitor comienza a descargarse también es máxima la tensión aplicada a este circuito, o sea la tensión en el capacitor, y, en consecuencia, la corriente también es máxima. Al descargar el capacitor, tanto la tensión como la corriente en el circuito de descarga disminuyen hasta que finalmente, ambas valen cero cuando el capacitor está totalmente descargado.



unidad de capacitancia

La capacitancia es una medida de *lo bien* que un capacitor puede *almacenar* carga eléctrica. Más exactamente, la capacitancia es proporcional a la *cantidad de carga* (en coulombs) se almacena en el capacitor por cada volt que se le aplica. En realidad, la carga neta almacenada en un capacitor es cero, ya que ambas placas tienen cargas iguales de polaridades *opuestas*. Por lo tanto, la "carga almacenada en un capacitor", significa la carga almacenada en cualquiera de las placas del capacitor. Si a dos capacitores se les aplican 100 volts y uno almacena 5 coulombs de carga en cada placa, en tanto que el otro almacena 2 coulombs, el que almacena 5 coulombs tiene mayor capacitancia.

Planteado en otra forma, si ambos capacitores almacenan 5 coulombs, pero se ha necesitado aplicarle 100 volts a uno de ellos y al otro sólo 50 volts, el que ha requerido menos tensión para almacenar la misma carga, tiene mayor capacitancia.

La unidad de capacitancia es el *farad,* nombre que se ha dado en honor del físico Michael Faraday. Un capacitor tiene una capacitancia de un farad cuando con un volt aplicado a sus placas, almacena un coulomb de carga en cada una de ellas. La ecuación que da la capacitancia es:

$$C = Q/E$$

donde C es la capacitancia, dada en farads, Q es la carga en una placa medida en coulombs, y E es la tensión aplicada al capacitor.

En la práctica, el farad representa una capacidad de almacenamiento enorme. Por esta razón, casi siempre se usan unidades fraccionales del farad. Estas unidades fraccionales son el microfarad (μf) y el micromicrofarad ($\mu\mu$f), conocido como picofarad (pf).

CONVERSION DE UNIDADES

1 farad (f) = 1.000, microfarads (μf) = 1.000,000.000,000 picofarads (pf)

$$1 \text{ microfarad } (\mu f) = \frac{1}{1.000,000} \text{ farad (f)} = 1.000,000 \text{ picofarads (pf)}$$

$$1 \text{ picofarad (pf)} = \frac{1}{1.000,000,000,000} \text{ farad (f)}$$

$$1 \text{ picofarad (pf)} = \frac{1}{1.000,000} \text{ microfarad } (\mu f)$$

1 picofarad (pf) = 1 micromicrofarad ($\mu\mu$f)

constante capacitiva de tiempo

Cuando se conecta un capacitor a una fuente de tensión de c-c, se carga muy rápidamente. Si *no hubiese resistencia* en el circuito de carga, el capacitor se cargaría totalmente en forma casi *instantánea*. La resistencia tiene el defecto de ocasionar una dilación en el tiempo necesario para la carga. Además, como se sabe, todo circuito tiene algo de resistencia, por lo cual se requiere cierto tiempo para que un capacitor se cargue completamente. El tiempo exacto que se necesita depende tanto de la resistencia (R) en el circuito de carga como de la capacitancia (C) del capacitor. La relación entre estas dos cantidades y el tiempo de carga se expresa según la ecuación:

$$t = RC$$

donde t es la *constante capacitiva de tiempo*, que representa el tiempo necesario para que el capacitor se cargue a un 63.2 por ciento de su tensión de carga total. Cada vez que transcurre un lapso igual a la constante de tiempo, la tensión en el capacitor aumenta 63.2 por ciento de lo que le falta para alcanzar la tensión máxima; así, después de transcurrir dos de estos intervalos de tiempo (2t) el capacitor se ha cargado al 86.4 por ciento de su tensión máxima; después de 3t a 94.9 por ciento después de 4t a 98.1 por ciento y después de 5t a más de 99 por ciento. Se considera que el capacitor está *totalmente cargado* después de un período igual a *cinco* veces la constante de tiempo.

En forma similar, la constante capacitiva de tiempo indica también el tiempo necesario para que la tensión en un capacitor que se descarga se reduzca a varios porcentajes de su valor máximo.

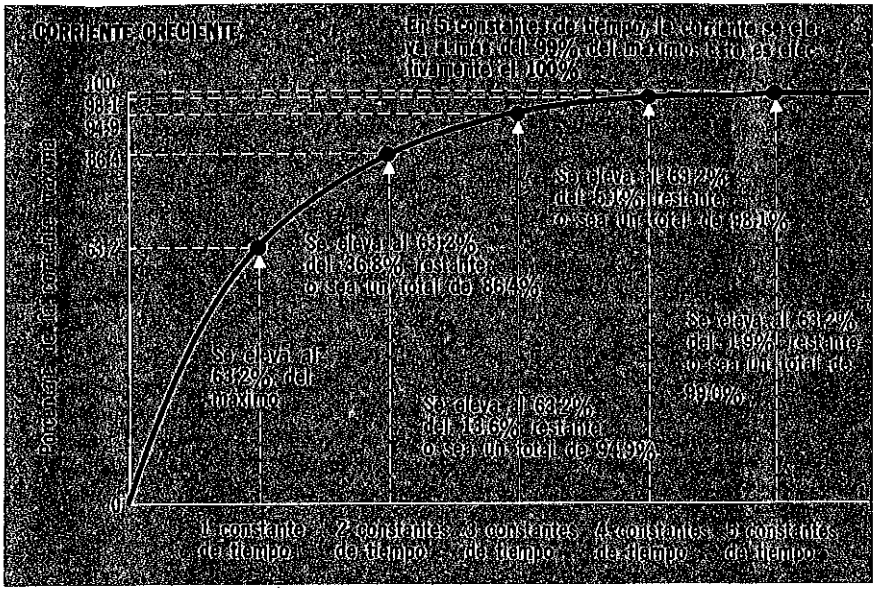
Probablemente se ha notado una semejanza entre la constante capacitiva de tiempo y la constante inductiva de tiempo, que se ha descrito antes. La semejanza consiste en que la tensión en un capacitor se eleva y reduce exactamente de la misma manera y con la misma rapidez que la corriente en un inductor. Esto se puede apreciar fácilmente comparando las curvas ilustradas en la página siguiente con las de la constante inductiva de tiempo que aparecen en la página 3-60.

UNIDADES DE CONSTANTE CAPACITIVA DE TIEMPO

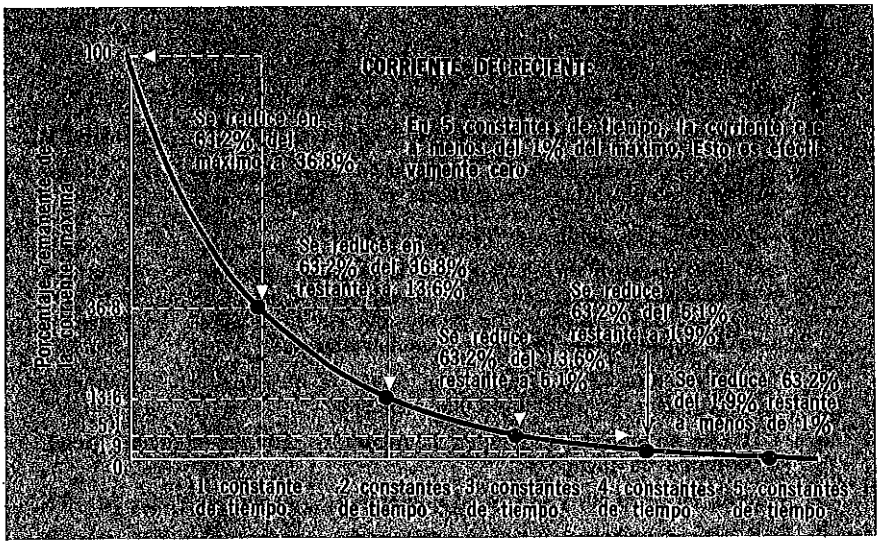
Si R está en	Y C está en	Entonces t estará en
Ohms	Microfarads	Microsegundos
Kilohms	Microfarads	Milisegundos
Megohms	Microfarads	Segundos
Ohms	*Picofarads	Microsegundos/1.000.000
Kilohms	Picofarads	Microsegundos/1.000
Megohms	Picofarads	Microsegundos

* Conocido también como micromicrofarad.

constante capacitiva de tiempo (cont.)



En cada constante de tiempo, la corriente aumenta a un valor que está 63.2% más cercano a su valor máximo



En cada constante de tiempo, la corriente disminuye a un valor que está 63.2% más cercano a cero

resumen

☐ La capacitancia existe siempre que dos conductores estén separados por un material aislante y tengan una diferencia de potencial entre sí. ☐ La unidad básica de capacitancia es el farad; sin embargo, se usan como unidades prácticas el microfarad y el picofarad (conocido también como micromicrofarad). ☐ Los capacitores son dispositivos que aumentan capacitancia a los circuitos. ☐ Los capacitores se pueden cargar conectando baterías o generadores a sus placas.

☐ Cuando existe una diferencia de potencial o tensión entre las placas de un capacitor, se dice que éste está cargado. ☐ Un capacitor cargado tiene una fuerza electrostática o campo eléctrico, entre las placas. El campo eléctrico almacena energía. ☐ En un circuito de c-c, aunque los electrones fluyan a través de los conductores del circuito cuando el capacitor está cargándose, no fluyen a través del aislamiento entre las placas del capacitor. ☐ Cuando se deja que un capacitor cargado pierda su carga, la trayectoria que siguen los electrones durante la descarga se conoce como trayectoria de descarga.

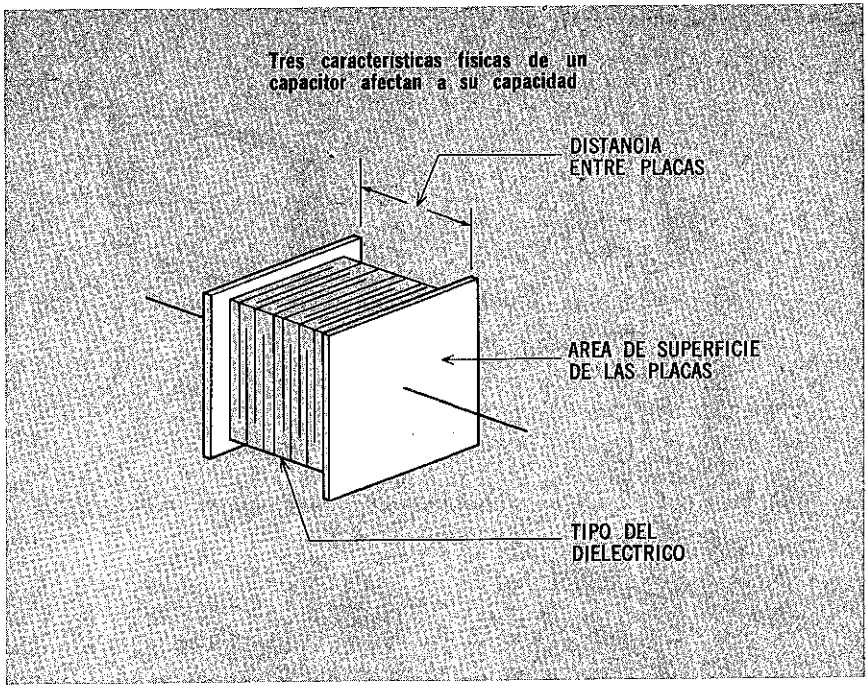
☐ La ecuación que da la capacitancia es $C = Q/E$, donde Q es la carga almacenada por el capacitor y E es la tensión en el capacitor. ☐ La constante capacitiva de tiempo en un circuito RC se expresa según la ecuación: $t = RC$. ☐ Se requieren cinco constantes de tiempo para cargar un capacitor de cero a más de 99 por ciento de su carga máxima. ☐ La forma de onda de la tensión originada en un capacitor es similar a la del aumento de corriente en un inductor.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo se almacena energía en un capacitor?
2. Exprese 2 farads en picofarads y en microfarads.
3. Exprese 2 picofarads en microfards. Exprese 2 farads en microfarads.
4. ¿Cuál es la capacitancia de un capacitor que almacena 5,000 microcoulombs cuando la tensión aplicada es de 1,000 volts?
5. ¿Cuál es la *constante capacitiva de tiempo*?
6. Para que un capacitor se cargue a la máxima tensión, cuando se conecta en serie con una resistencia a una batería, se necesitan 10 segundos. ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito? ¿Qué tanto tiempo tarda el capacitor en descargarse completamente?
7. Para el circuito de la pregunta 6, ¿cuál es el valor del capacitor si el resistor tiene un valor de 5,000 megohms?
8. Si R está en ohms y C está en microfarads, ¿en qué unidades estará la constante de tiempo t?
9. Si t está en segundos y C está en microfarads, ¿en qué unidades está R?
0. Si R está en megohms y t en microsegundos, ¿en qué unidades está C?

factores que influyen en los valores de capacitancia

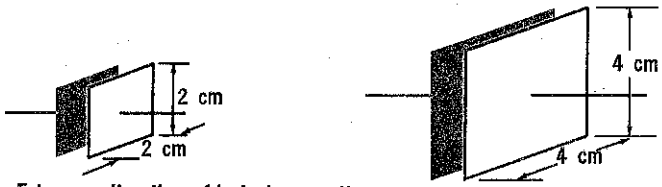
Existen tres factores que determinan la capacitancia de un capacitor. Son los siguientes: 1) el *área* de las placas; 2) la *distancia* entre las placas; 3) el material aislante o *dieléctrico*, según se le llama, que se usa entre las placas. La cantidad de tensión aplicada a un capacitor o la cantidad de carga almacenada en él, *no* tienen efecto en la capacitancia. Naturalmente, esto presupone que el capacitor no está conectado a tensiones excesivamente altas, las cuales podrían dañarlo o destruirlo.



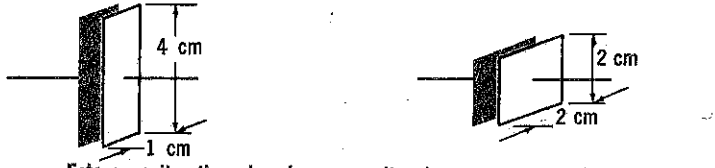
Existen otros factores que pueden afectar a la capacitancia y que deben considerarse al seleccionar capacitores para ciertas aplicaciones. Estos factores son la frecuencia de la tensión aplicada, la temperatura del capacitor y el tiempo de uso que tenga el capacitor. Generalmente, estos otros factores sólo tienen ligeros efectos en la capacitancia y puede hacerse caso omiso de ellos. Sin embargo, en otras ocasiones son muy importantes y deben tomarse en consideración. Más adelante se proporciona información más detallada sobre esta cuestión.

efecto del área de las placas

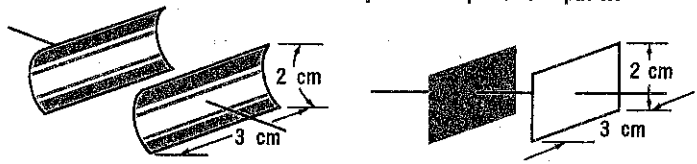
Si dos capacitores están hechos con el mismo dieléctrico y existe la misma separación entre sus placas, pero éstas tienen tamaños diferentes, el capacitor cuyas placas tengan *mayor superficie* tendrá la capacitancia *más alta*. Esto se debe a que, cuanto más grandes sean las placas, más carga se puede almacenar en ellas. Una placa negativa grande tiene más espacio que una placa pequeña para acumular electrones libres. Y una placa positiva grande tiene más electrones libres para transmitir con respecto a una pequeña. Si la separación entre placas y el dieléctrico se mantiene constante, la capacitancia de un capacitor es *directamente proporcional* al área de las placas. El duplicar el área de la superficie produce una duplicación de la capacitancia. Igualmente, si el área se reduce a la mitad, la capacitancia se reducirá también. Naturalmente, estas características sólo se aplican si las placas están completamente alineadas y son paralelas entre sí.



Este capacitor tiene ¼ de la capacitancia de este capacitor



Este capacitor tiene la misma capacitancia que este capacitor



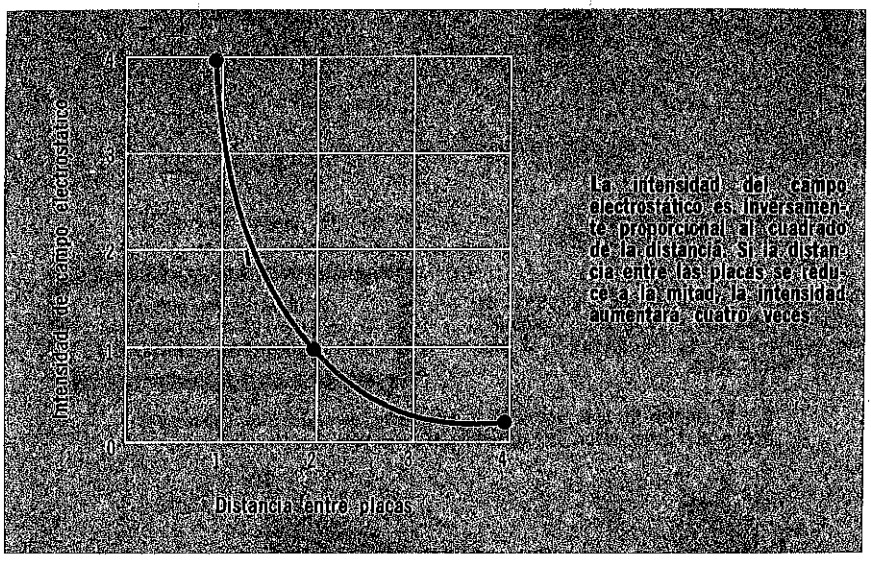
Este capacitor tiene la misma capacitancia que este capacitor

Se ha señalado previamente que el farad representa una cantidad enorme de carga almacenada y ésta es la razón por la que comúnmente se emplean unidades tales como el microfarad y el picofarad. Como ejemplo de la naturaleza impráctica del farad, considere el área de placa que se necesitaría para un capacitor de 1 farad. Si la separación entre las placas fuera de 1 milímetro y se usara aire como dieléctrico, cada placa debería tener aproximadamente 10 kilómetros de alto por 10 de ancho.

efecto de la separación entre las placas

Según se ha estudiado, el capacitor se carga debido a que se acumulan electrones en la placa negativa que salen de la placa positiva. En realidad, las cargas en cada placa afectan a la otra grandemente. Cuanto mayor sea la carga negativa originada en la placa negativa, más electrones serán *repelidos* de la placa positiva; cuanto mayor sea la carga en la placa positiva, más electrones serán *atraídos* a la placa negativa. En esta forma, el campo electrostático originado entre las placas ayuda a la tensión de la fuente. Mientras más fuerte sea el campo para una carga dada, más ayudará a la tensión aplicada.

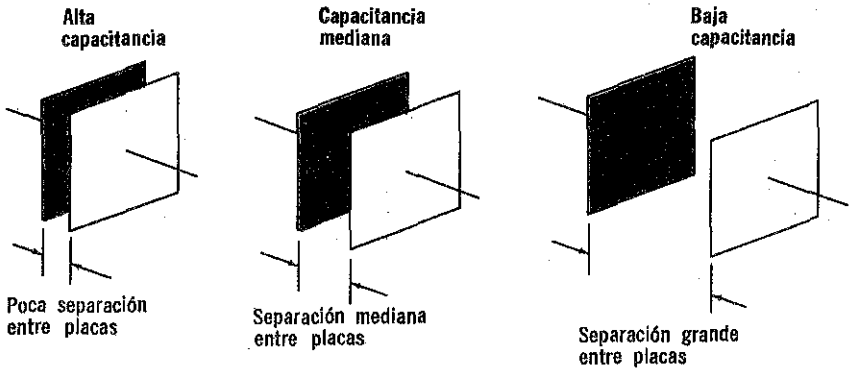
Con referencia a la dicho en el volumen 1, se recordará la *ley de Coulomb aplicada a cargas eléctricas*: La intensidad de las líneas electrostáticas de fuerza es inversamente proporcional al *cuadrado* de la distancia entre las cargas. Esto significa que si dos placas cargadas se apartan de manera que se duplique el espacio entre ellas, la intensidad del campo electrostático se reducirá a ¼ de su valor previo. Y un campo más débil dará *menos ayuda* a la tensión aplicada; así se acumularán menos electrones en la placa negativa y un número menor de ellos saldrán de la placa positiva.



Por lo tanto, la capacitancia es *inversamente proporcional* a la distancia entre las placas del capacitor. Esto significa que cuanto menor sea la distancia entre las placas, mayor será la capacitancia. Recíprocamente, cuanto mayor sea la distancia entre las placas, más pequeña será la capacitancia.

efecto de la separación entre las placas (cont.)

Sin embargo, existe un *límite* en cuanto a la proximidad a que pueden colocarse las placas. Si las placas están demasiado juntas, los electrones podrán ser *arrancados* de la placa negativa por el potencial de la placa positiva. Esta *ruptura* puede dañar e incluso destruir al capacitor. En realidad, el espaciamiento más pequeño posible antes de que ocurra la falla depende tanto de la tensión en el capacitor como del dieléctrico entre las placas. En el caso de altas tensiones, la ruptura ocurrirá aun en capacitores cuyas placas estén muy separadas; tensiones más bajas permitirán menores separaciones. Sin embargo, algunos capacitores obtenibles comercialmente tienen espaciamientos entre sus placas tan pequeños como 0.0125 milímetros y pueden resistir tensiones de cientos de volts.

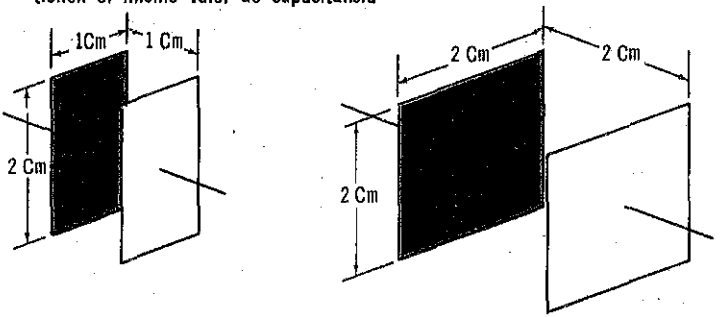


La capacitancia de un capacitor es inversamente proporcional a la distancia entre las placas

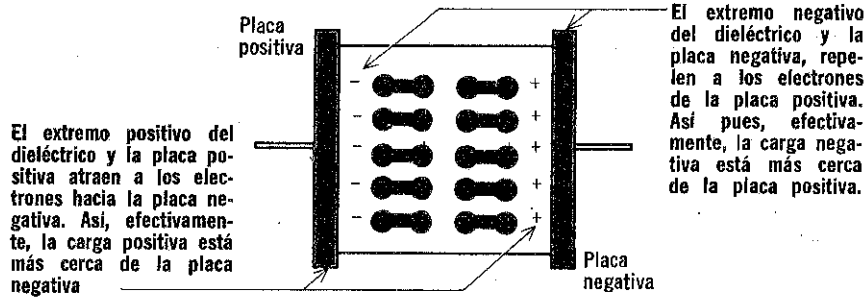
Sin considerar el efecto del dieléctrico, la ecuación siguiente relaciona la capacitancia con el área de las placas y la distancia entre ellas

$$C = \frac{A \text{ (Área de las placas)}}{d \text{ (Distancia entre placas)}}$$

Por el empleo de esta ecuación, puede verse que estos dos capacitores tienen el mismo valor de capacitancia



efecto del dieléctrico



Las moléculas polares se alínean con el campo electrostático moviendo efectivamente las cargas sobre las placas y acercándolas para aumentar la capacitancia

El material aislante usado entre las placas de un capacitor recibe el nombre de *dieléctrico*. El dieléctrico puede ser aire, vidrio, papel o inclusive el vacío. De hecho, cualquier material *aislante* sirve, pero algunos producen una capacitancia elevada y, por lo tanto, son buenos dieléctricos en tanto que otros dan una capacitancia baja y en consecuencia son malos dieléctricos.

La diferencia entre los buenos y malos dieléctricos se puede explicar según el grado de facilidad con que las fuerzas electrostáticas afectan a las moléculas del dieléctrico. Muchos materiales aislantes tienen moléculas cuyos electrones orbitales están localizados asimétricamente. Un lado de la molécula tiene más electrones que el otro, de modo que, en consecuencia, la molécula tiene un lado negativo y un lado positivo. Estas moléculas reciben el nombre de *moléculas polares*. Tienen una carga neta de cero debido a que hay un número igual de electrones y protones; pero debido a la acumulación desigual de electrones, la molécula tiene un polo positivo y otro negativo.

Cuando este dieléctrico se inserta entre las placas de un capacitor cargado, un lado del dieléctrico está expuesto a la placa cargada positivamente y el otro a la placa cargada negativamente. Las moléculas polares en el dieléctrico, serán atraídas hacia las placas cargadas. Como resultado, las moléculas *se alinean*, con sus polos positivos hacia la placa negativa y sus polos negativos hacia la placa positiva. Entonces se produce una fuerza electrostática entre cada extremo del dieléctrico y la placa más cercana. La dirección de estas fuerzas es tal que el extremo negativo del dieléctrico repele a los electrones de la placa positiva y al hacerlo ayuda a la placa negativa, que hace lo mismo. En forma similar, el extremo positivo del dieléctrico atrae electrones hacia la placa negativa, ayudando así a la placa positiva. Por lo tanto, el dieléctrico mueve efectivamente a las cargas de las placas del capacitor *acercándolas* y, según se ha visto, esto ocasiona un aumento de capacitancia.

constante y resistencia dieléctricas

Puesto que el material dieléctrico tiene un efecto significativo en el valor de capacitancia de un capacitor, a menudo es conveniente comparar varios materiales desde el punto de vista de su eficacia como dieléctricos. Para este objeto, se usa un sistema de clasificación en el cual las propiedades dieléctricas de los materiales se relacionan con las del *aire*. En realidad, el sistema se basa en las propiedades dieléctricas de un *vacío puro*. Sin embargo, hay tan poca diferencia entre el dieléctrico de aire y un dieléctrico de vacío que, para toda aplicación práctica, se pueden considerar idénticos.

En este sistema, al aire se le asigna el valor de 1. A los otros materiales tienen asignados valores que indican el grado en que serán más efectivos, como materiales dieléctricos, que el aire. Por ejemplo, un capacitor con un material dieléctrico cuyo valor sea 5, tendrá cinco veces la capacitancia de un capacitor similar con dieléctrico de aire. El valor de cada material recibe el nombre de *constante dieléctrica* de ese material. La constante dieléctrica generalmente se designa con la letra K. Por lo tanto, para apreciar la relación de todas las propiedades físicas de un capacitor en comparación con su capacidad, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$C = K \frac{A \text{ (área de las placas)}}{d \text{ (espaciamiento entre las placas)}}$$

Cada material tiene una propiedad llamada *resistencia dieléctrica*. Este valor indica la máxima tensión que puede ser aplicada a través del dieléctrico *en forma segura*. Si se excede la tensión, las moléculas del material dieléctrico se rompen y se produce un arco entre las placas a través del dieléctrico. La resistencia dieléctrica se expresa como la máxima tensión permisible para un espesor específico de un material.

CONSTANTES DIELECTRICAS

Material	Constante dieléctrica (K)
Aire	1
Resina	2.5
Hule duro	2.8
Papel seco	3.5
Vidrio	4.2
Baquelita	4.5 a 7.5
Mica	5 a 9
Porcelana	5.5
Mycalex	8
Compuestos de Dióxido de titanio	90 a 170

RESISTENCIAS DIELECTRICAS

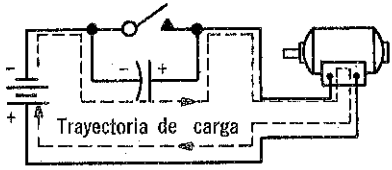
Material	Resistencia dieléctrica (Volts/0.001 pulgada) (Volts/0.01 cm)
Aire	80
Fibra	50
Vidrio	200
Aceite de ricino	370
Baquelita	500
Porcelana	750
Papel (parafinado)	1,200
Papel (encerado)	1,800
Mica	2,000

circuitos capacitivos de c-c

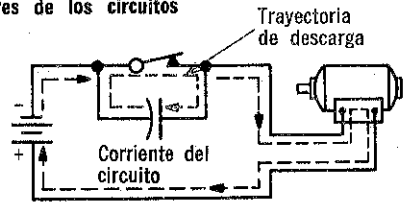
Un circuito de c-c que sólo tenga capacitancia se comporta en forma notoriamente diferente a un circuito de c-c que sólo contenga resistencia o inductancia. Tanto la resistencia como la inductancia *se oponen* a la corriente del circuito, aunque de maneras distintas. Por su parte, la capacitancia *evita* el paso de corriente continua, una vez que la corriente de carga inicial ha cargado al capacitor. Por lo tanto, se dice que los capacitores *bloquean* a la c-c. Así, pues, no existen muchas aplicaciones para los capacitores en circuitos de c-c. Esto no significa que no se usen capacitores en circuitos de c-c. Existen muchas aplicaciones en c-c para las cuales los capacitores son adecuados. Una de ellas es evitar el arqueo en los contactos de interruptores eléctricos, según se muestra. Cuando un interruptor abre un circuito en el cual circula una gran corriente, la corriente tiende a continuar fluyendo. Esto causa el arqueo en los contactos del interruptor que, a la larga, destruirán el interruptor. Un capacitor conectado entre los contactos del interruptor proporciona una trayectoria para la corriente hasta que el interruptor está totalmente abierto y el peligro de arqueo ha pasado.

Los capacitores se usan también con baterías para dar grandes cantidades de corriente muy poco tiempo, que la batería sola no podría suministrar. Con la batería conectada a las terminales del capacitor, la batería puede suministrar una corriente a un nivel bajo y seguro, durante un largo período para cargar el capacitor. Luego, si el capacitor está conectado, por ejemplo, a una lámpara de destello, puede descargarse muy rápidamente y suministrar un valor de corriente más alto del que podría hacerlo la batería en un tiempo breve.

Los capacitores pueden dar protección contra arqueo en los interruptores de los circuitos de c-c

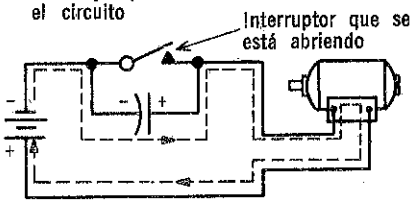


Cuando el interruptor se abre, el capacitor se carga con el voltaje de la fuente



Cuando se cierra el interruptor, el capacitor descarga, a través de los contactos del interruptor. Al cerrar el interruptor, el capacitor permanece en la condición de descarga (ambas placas neutras) y no tiene efecto ya que está conectado en corto en el circuito

De no ser por el capacitor, en el instante de abrir el interruptor, el voltaje producido en los contactos del interruptor excedería a la resistencia dieléctrica de la pequeña masa de aire entre los contactos abiertos. Por lo tanto, se produciría arqueo. Sin embargo, el capacitor, da una trayectoria de baja resistencia alrededor de los contactos. Por lo tanto, la corriente fluye a través del capacitor, en lugar de hacerlo a través de la separación de aire hasta que el capacitor se carga



resumen

☐ La capacitancia de un capacitor está determinada por tres factores: el área de las placas, la distancia existente entre ellas y el material aislante que se usa entre las mismas. ☐ Los efectos de los tres factores que determinan la capacitancia se expresan según esta ecuación: $C = KA/d$, la cual indica que la capacitancia es directamente proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a la distancia que hay entre ellas. ☐ Otros factores —como la frecuencia de la tensión aplicada, la temperatura y el tiempo de uso que tenga el capacitor— pueden afectar la capacitancia. Sin embargo, generalmente estos efectos son ligeros.

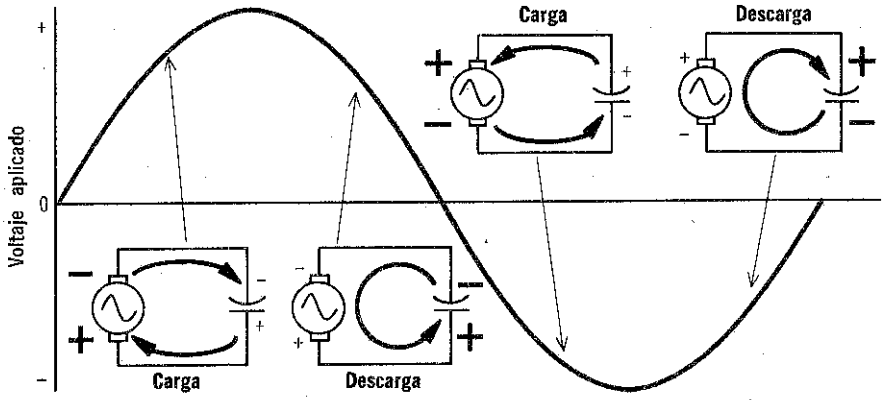
☐ El material aislante que se usa entre las placas de un capacitor recibe el nombre de dieléctrico. ☐ Un buen dieléctrico aumenta la capacitancia permitiendo acercar más las placas del capacitor. ☐ La constante dieléctrica K, indica el grado de eficacia que tiene un material como dieléctrico. ☐ Un sistema para comparar las constantes dieléctricas de varios materiales, y que está en uso, toma el aire como referencia con una constante dieléctrica de 1. ☐ La tensión máxima que se puede aplicar a un dieléctrico recibe el nombre de resistencia dieléctrica.

☐ En circuito de c-c los capacitores cargados evitan el paso de corriente continua. Por lo tanto, se dice que los capacitores bloquean la c-c. ☐ Los capacitores se usan también para alimentar corrientes elevadas durante intervalos cortos.

preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son los tres factores que determinan la capacitancia de un capacitor?
2. ¿Por qué se usan los dieléctricos en los capacitores?
3. ¿Qué significa la expresión *resistencia dieléctrica* de un material?
4. ¿Qué significa *constante dieléctrica*?
5. ¿Qué material tiene mayor constante dieléctrica?: ¿aire o hule duro? ¿aire o vidrio?
6. ¿Qué sucede con la capacitancia de un capacitor si se duplica el área de sus placas y la distancia entre las mismas se reduce a la mitad?
7. Si en un capacitor se duplica la constante dieléctrica sin cambiar el área de las placas, ¿cómo se pueden ajustar las placas de manera que la capacitancia permanezca invariable?
8. Si la tensión aplicada a un capacitor se duplica, ¿qué sucede con la capacitancia?
9. ¿Cómo se usan los capacitores en una lámpara de destello ("flash") para fotografía?
10. ¿Por qué se dice que los capacitores bloquean la c-c en un circuito de corriente continua?

circuitos capacitivos de c-a



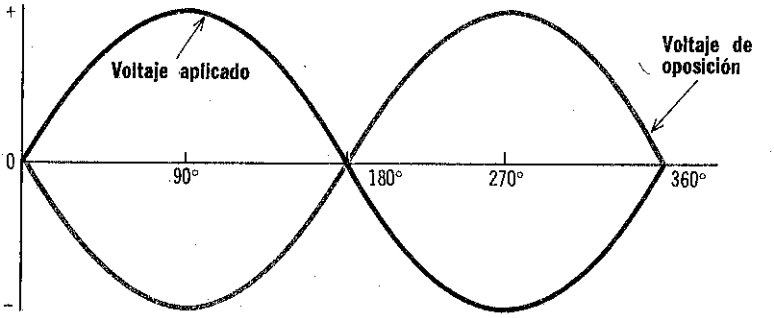
Cuando un capacitor se conecta a una fuente de c-a, se carga y descarga alternadamente, primero en una dirección y luego en la otra

Un capacitor bloquea la c-c. Por lo tanto, una vez que está totalmente cargado por la aplicación de una tensión de c-c, no fluirá más corriente en el capacitor a menos que se cuente con algún medio para descargarlo. En un circuito de c-a la tensión aplicada, así como la corriente que produce, cambian periódicamente de dirección. Como resultado, un capacitor en un circuito de c-a se carga primeramente por la tensión que se aplica en una dirección. Luego, cuando la tensión aplicada comienza a disminuir, fluye menos corriente, pero el capacitor sigue estando cargado en la misma dirección. En consecuencia, al continuar reduciéndose la tensión aplicada, la que se origina en el capacitor aumenta. Entonces, el capacitor funciona como fuente y comienza a *descargarse*. El capacitor se descarga totalmente cuando la tensión aplicada desciende hasta cero e invierte su dirección. Luego, el capacitor comienza a cargarse nuevamente pero en la misma dirección hacia donde ha descargado previamente. Esto continúa hasta que la tensión aplicada comienza nuevamente a reducirse y se repite el proceso. Esta carga y descarga que alterna primeramente en una dirección y luego en la otra, ocurre durante cada ciclo de la c-a aplicada. Por lo tanto, una corriente alterna fluye *continuamente* en el circuito. Entonces, se puede decir que, aunque un capacitor bloquea la c-c, *deja pasar* a la c-a.

La trayectoria de carga que sigue un capacitor en un circuito de c-a va de la terminal negativa de la fuente a una placa del capacitor y de la otra placa a la terminal positiva de la fuente. La trayectoria de descarga para el capacitor empieza en la placa negativa, pasa a través de la fuente de potencia y regresa a la placa positiva. Sin embargo, debe tenerse presente que en un circuito de c-a, los términos placa positiva y placa negativa se refieren a un instante específico.

relaciones entre tensión y carga

Cuando se conecta una fuente de tensión de c-a a las terminales de un capacitor, la cantidad de *carga* en las placas del capacitor sigue el patrón sinusoidal de la tensión aplicada. En el instante en que la tensión aplicada sea cero, no habrá flujo de corriente, por lo que no existe potencial de carga para el capacitor; ambas placas son neutras. Al comenzar la fuente de tensión su elevación sinusoidal de cero, fluye corriente y la carga de las placas del capacitor comienza a desarrollarse. La carga continúa creciendo al aumentar la tensión aplicada. Cuando la tensión aplicada llega a su valor fijo, la carga de las placas es máxima. Esta relación entre la tensión aplicada y la carga de las placas del capacitor continúa a lo largo de todo el ciclo de tensión aplicada. Ambas disminuyen y llegan a cero simultáneamente y luego aumentan a un máximo en la dirección opuesta; finalmente, ambas disminuyen, llegando simultáneamente a cero.



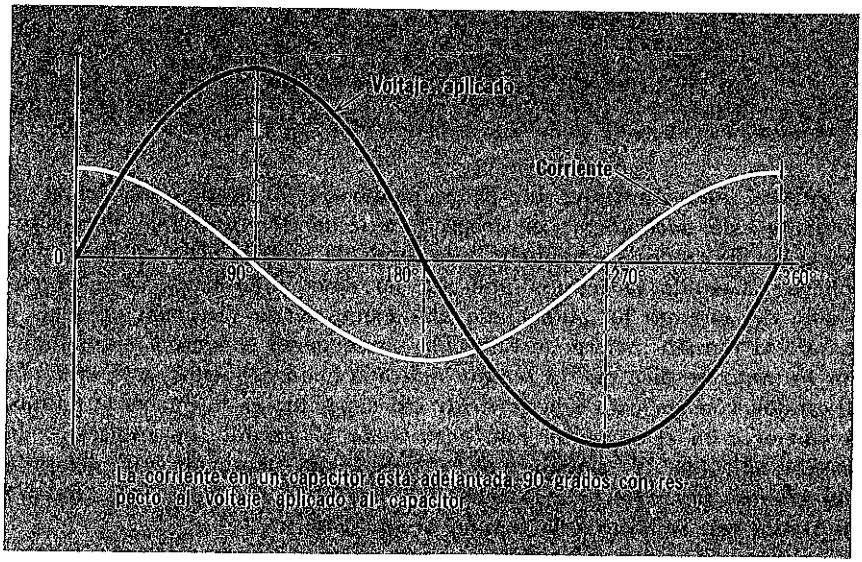
El voltaje de oposición que se origina en un capacitor por la acumulación de cargas de las placas del capacitor está defasado 180 grados con respecto al voltaje aplicado al capacitor

Las cargas de las placas producen un campo electrostático que se manifiesta como tensión en el capacitor. Esta tensión de carga sigue exactamente a la tensión aplicada. Si se mide el patrón de la forma de onda en la fuente y se compara con el patrón en el capacitor, se verá que son iguales. En realidad, esto debe ser así debido a que, cuando se mide uno, automáticamente debe medirse el otro, ya que se consideran uno en relación con el otro. Puesto que la carga de las placas del capacitor sigue exactamente el mismo patrón sinusoidal que la tensión aplicada, se puede pensar que están en fase. Sin embargo, la carga del capacitor en realidad está en fase *opuesta* a la tensión aplicada, de manera que están en oposición. Puesto que el capacitor produce su propia tensión, funciona como una fuente de tensión que tiende a producir flujo de corriente en la batería. En consecuencia, la tensión del capacitor recibe a menudo el nombre de *tensión de oposición* debido a que está defasado 180 grados con respecto a la tensión aplicada.

relaciones entre tensión y corriente

Cuando se conecta una fuente de tensión de c-a a un capacitor, fluye una corriente *máxima* en el circuito en el instante en que la tensión de la fuente comienza a aumentar sinusoidalmente desde cero. Al principio, puede parecer extraño que fluya una corriente máxima cuando la tensión de la fuente tiene su valor más bajo. Pero, según lo que se estudió anteriormente acerca de los circuitos de c-c, se recordará que esta corriente en realidad es el movimiento de electrones libres de la terminal negativa de la fuente a una placa del capacitor y de la otra placa a la terminal positiva de la fuente; como resultado, en este instante ocurrirá la máxima corriente, ya que las placas son neutras y *no presentan* fuerzas electrostáticas de oposición a las terminales de la fuente. Por lo tanto, según concluimos de la ley de Ohm, si la oposición a la corriente es mucho muy baja, entonces, una pequeña tensión aplicada, puede producir el flujo de una corriente considerable.

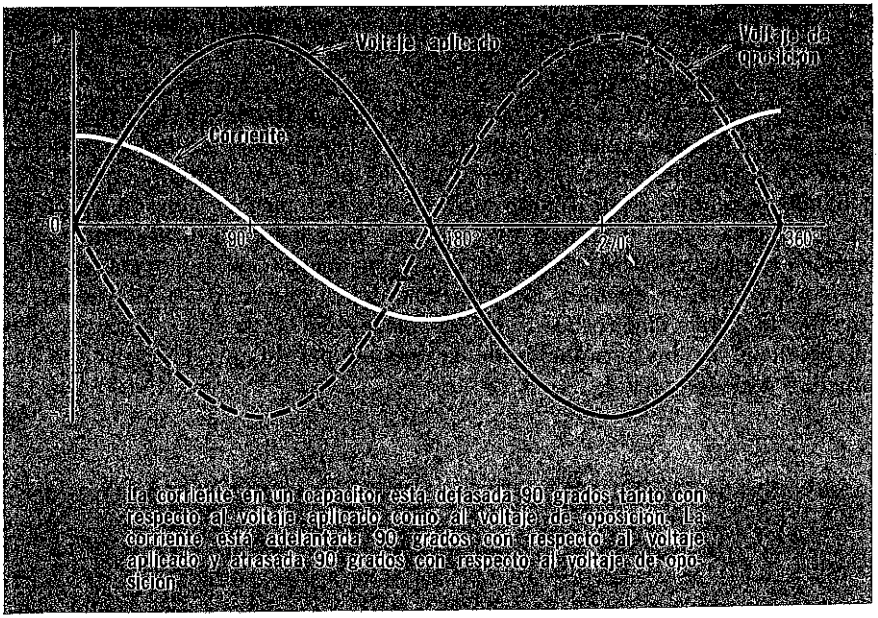
Sin embargo, al aumentar la tensión de la fuente, las cargas producidas por el flujo de la corriente se van estableciendo en las placas del capacitor. Por consiguiente, la tensión de carga presenta una *oposición creciente* a la tensión más baja y, por lo tanto, la corriente *disminuye*. Cuando la tensión de la fuente alcanza su valor pico, la tensión de carga en las placas del capacitor es máxima. Esta carga es suficiente para *anular* completamente la tensión de la fuente por lo que cesa el flujo de corriente en el circuito. Cuando empieza a disminuir la tensión de la fuente, la carga electrostática en las placas del capacitor es mayor que el potencial de las terminales de la fuente, por lo que el capacitor comienza a descargarse.



La corriente en un capacitor está adelantada 90 grados con respecto al voltaje aplicado al capacitor.

relaciones entre tensión y corriente (cont.)

Los electrones fluyen de la placa negativa a la terminal negativa de la fuente (que se está volviendo menos negativa), en tanto que un número igual de electrones fluyen de la terminal positiva de la fuente (que se vuelve menos positiva) a la placa positiva. Esta dirección de flujo de electrones es *opuesta* a la dirección que tienen los electrones mientras se carga el capacitor. De este modo, en el punto en que la tensión aplicada llega a su valor máximo y comienza a disminuir, la corriente en el circuito pasa por cero y cambia de dirección. Como puede apreciarse en



La corriente en un capacitor está defasada 90 grados tanto con respecto al voltaje aplicado como al voltaje de oposición. La corriente está adelantada 90 grados con respecto al voltaje aplicado y atrasada 90 grados con respecto al voltaje de oposición.

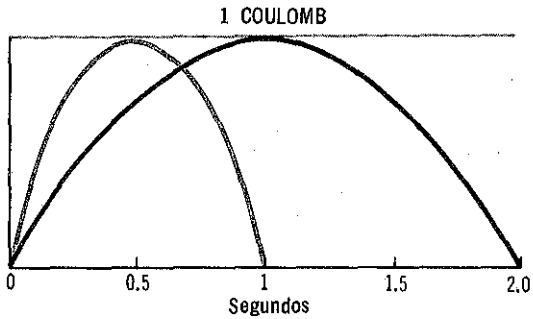
la gráfica, esto constituye un defasamiento de 90 grados, en donde la corriente está *adelantada* con respecto a la tensión aplicada. Esta diferencia de 90 grados se mantiene a lo largo de todo el ciclo de la tensión aplicada. Cuando la tensión aplicada ha descendido hasta cero, la corriente del circuito ha aumentado al máximo en la dirección opuesta, y cuando la tensión invierte su dirección, la corriente comienza a disminuir. Por lo tanto, se dice que la *tensión* aplicada a un capacitor, está *atrasada* 90 grados, con respecto a la *corriente* del capacitor, o, lo que es lo mismo, la corriente en el capacitor está *adelantada* 90 grados con respecto a la *tensión* aplicada. Y, puesto que la tensión de oposición está defasada 180 grados con respecto a la tensión aplicada, la corriente está *atrasada* 90 grados con respecto a la tensión de oposición.

efecto que tiene la frecuencia en la corriente del capacitor

El flujo de corriente en un circuito capacitivo de c-a está formado por electrones libres que fluyen entre las terminales de la fuente de tensión y las placas del capacitor. Los electrones fluyen en una dirección en tanto que el capacitor se carga y en la dirección inversa durante el tiempo en que el capacitor se descarga y carga en la dirección opuesta. De acuerdo con lo estudiado en el volumen 1, la *cantidad de corriente,* es determinada por el *número de electrones* que fluyen por un punto cualquiera del circuito en la unidad de *tiempo.* Dicho de otra manera, la corriente es igual a la magnitud del flujo electrónico. En forma de ecuación, esto se puede expresar así:

$$I = Q/t$$

donde Q es el número de electrones transmitidos en el tiempo *t.*



Puesto que un ampere es un coulomb por segundo, una frecuencia que permite el paso de un coulomb en 0.5 segundos produce 2 amperes de corriente, en tanto que una frecuencia que permite el paso de un coulomb en un segundo produce 1 ampere

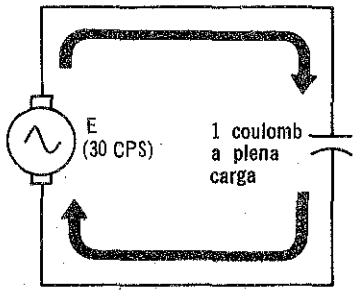
Cuando se aplica una tensión alterna a un capacitor, éste se carga y descarga alternadamente (en ambas direcciones) durante cada ciclo de la tensión aplicada. Para cualquier capacitor, el tiempo necesario para alcanzar la carga máxima depende de la frecuencia de la tensión aplicada. La razón es que, como ya se sabe, la carga de un capacitor sigue exactamente a la tensión aplicada. Cada vez que la tensión aplicada es máxima, el capacitor se encuentra en el punto máximo de su carga. Cuanto más alta sea la frecuencia, más rápidamente se eleva la tensión aplicada de cero al máximo. De lo que se sigue que cuanto más alta sea la frecuencia, más rápidamente alcanzará el capacitor su carga máxima.

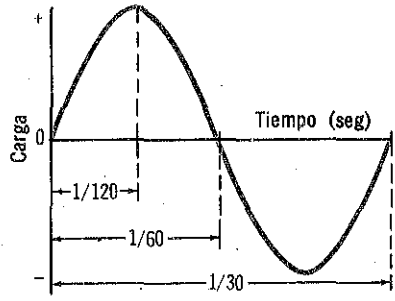
La cantidad de carga almacenada es independiente de la frecuencia; depende solamente de la capacitancia del capacitor y la amplitud de la tensión aplicada. Obsérvese, pues, que dos *capacitores idénticos* conectados a fuentes de *idéntica tensión,* que tengan *diferentes frecuencias,* tendrán valores *iguales* de Q pero valores *diferentes* de t en la ecuación $I = Q/t$.

efecto que tiene la frecuencia en la corriente del capacitor (cont.)

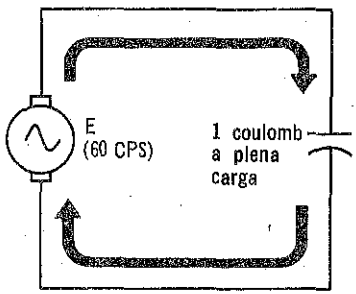
Por lo tanto, las corrientes de los dos capacitores serán diferentes, pues aunque pase el mismo *número* de electrones, éstos pasarán *más rápidamente* en un capacitor que en el otro, produciendo una corriente mayor. La *frecuencia más alta* (t más baja) produce la *corriente mayor* y la *frecuencia más baja* (t más alta) produce la *corriente menor.*

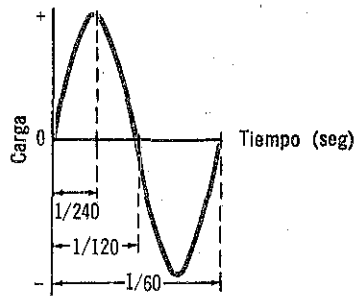
En resumen, la corriente a través de un capacitor es *directamente proporcional* a la frecuencia de la tensión aplicada. Frecuencias altas producen corrientes altas, en tanto que frecuencias bajas causan corrientes pequeñas en el mismo capacitor.





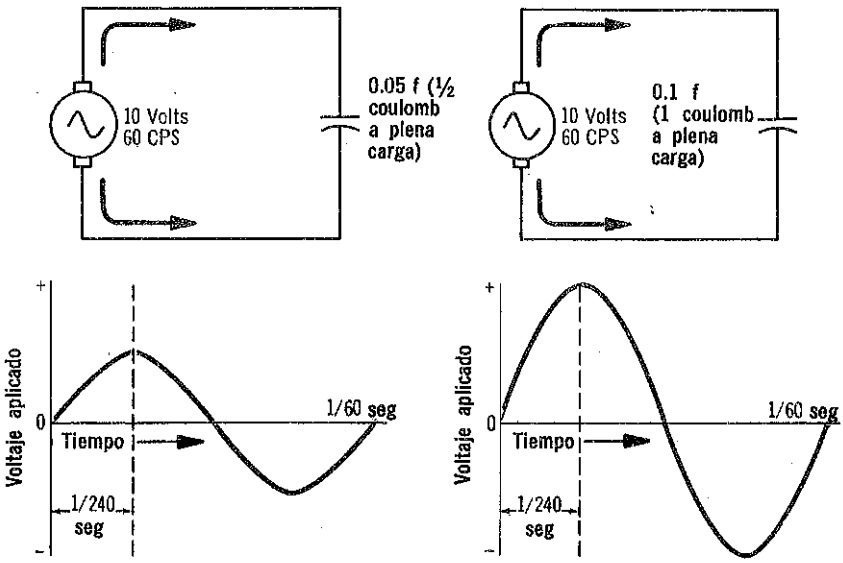
Supóngase que los capacitores en los circuitos de arriba y abajo son idénticos y las tensiones de fuente tienen la misma amplitud, pero con diferentes frecuencias, según se indica. Ambos capacitores alcanzarían una carga máxima de 1 coulomb, y descargarían esta cantidad durante el ciclo. Para que la carga se cree desde cero a 1 coulomb con una tensión de 30-cps, se necesitaría $\frac{1}{120}$ de segundo. La fórmula para la corriente ($I = Q/t$) da un flujo de corriente de 120 amperes. Sin embargo, para que el capacitor almacene una carga de 1 coulomb con la tensión a 60-cps, se necesitaría $\frac{1}{240}$ de segundo. Esto es 240 amperes de corriente.





efecto que tiene la capacitancia en la corriente del capacitor

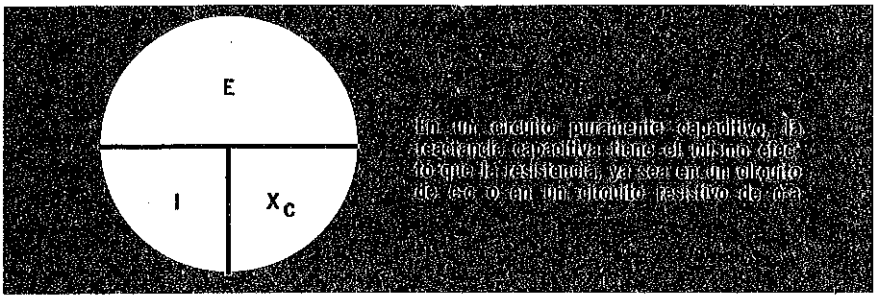
Según se ha estudiado, la capacitancia es la cantidad de carga almacenada en un capacitor por cada volt aplicado a sus terminales; o C = Q/E. Por lo tanto, la *carga total* almacenada es igual a la capacitancia multiplicada por la tensión aplicada; o Q = CE. Por lo tanto, si se aplican tensiones iguales a dos capacitores que tengan diferentes valores de capacitancia, las cargas almacenadas en los capacitores serán diferentes. El capacitor que tenga mayor capacitancia almacenará una carga mayor. Esto significa que, con la mayor capacitancia, se tendrá el flujo de más electrones libres durante los lapsos de carga y descarga. Si los tiempos necesarios para cargar completamente los dos capacitores fuesen iguales, como sucedería si las tensiones aplicadas tuviesen la misma frecuencia, la corriente en el capacitor con mayor capacitancia sería mayor que la corriente en el otro capacitor. De lo anterior, puede notarse que la corriente en un capacitor es *directamente proporcional* a la capacitancia.



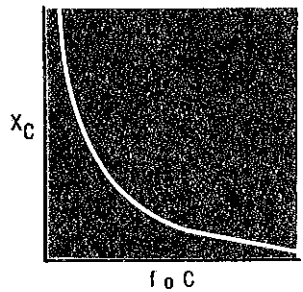
Usando la ecuación Q = CE se puede notar que el capacitor del primer circuito originará una carga de ½ coulomb y el capacitor del segundo circuito originará una carga de 1 coulomb. Puesto que las frecuencias de ambas fuentes son iguales, ambas cargas deben establecerse en $\frac{1}{240}$ de segundo. A partir de I = Q/t, se obtiene que el primer circuito conducirá 120 amperes y el segundo conducirá 240 amperes.

reactancia capacitiva

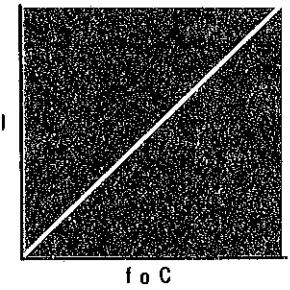
Un capacitor ofrece *oposición* al flujo de una corriente eléctrica de c-a en forma similar a un resistor o a un inductor. Se sabe que la cantidad de corriente alterna que conduzca un capacitor depende de la *frecuencia* de la tensión aplicada y de la *capacitancia*. Naturalmente, la amplitud de la tensión aplicada controla además el valor de la corriente; pero si la amplitud de la tensión se mantuviese constante, la corriente cambiaría siempre que cambiara la frecuencia o la capacitancia. Según



se ha estudiado, el flujo de corriente se puede calcular mediante ciertas ecuaciones; pero es mucho más conveniente aplicar la ley de Ohm. Pero la capacitancia y la frecuencia, como tales, no se pueden usar directamente en la ley de Ohm. Lo que se necesita es alguna característica que se pueda expresar en ohms, como por ejemplo la resistencia y la reactancia inductiva. En el caso de un capacitor puede usarse la *oposición* al flujo de corriente, ya que la oposición depende también de la frecuencia y la capacitancia. Sin embargo, como el flujo de corriente es *directamente proporcional* a la frecuencia y a la capacitancia, la oposición a la corriente debe ser *inversamente proporcional* a esas cantidades.



La disminución de la reactancia capacitiva con aumentos ya sea en la frecuencia o en la capacitancia no es lineal. Así pues, cada aumento adicional en la frecuencia o en la capacitancia resulta en un decremento más pequeño de X_C



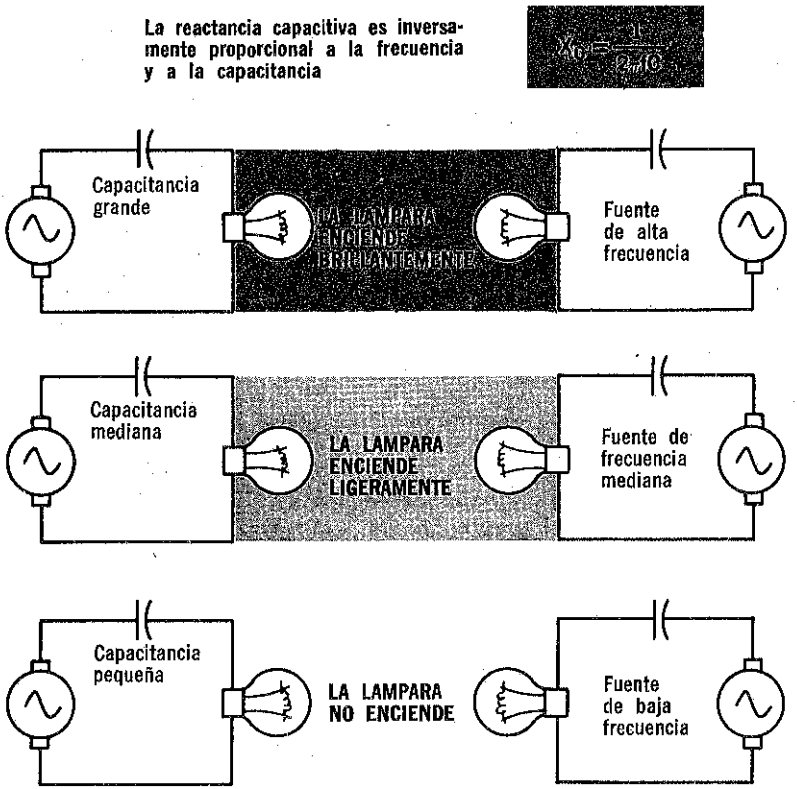
La corriente en un capacitor, por otra parte, aumenta linealmente al aumentar la frecuencia o la capacitancia

reactancia capacitiva (cont.)

La oposición que ofrece al flujo de la corriente un capacitor recibe el nombre de *reactancia capacitiva* y se abrevia X_C. La reactancia capacitiva se puede calcular según la siguiente expresión:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

donde 2π es aproximadamente 6.28; f es la frecuencia de la tensión aplicada en ciclos por segundo; y C es la capacitancia en farads. Obsérvese que cuanto más alta sea la frecuencia o más grande la capacitancia, menor será la reactancia capacitiva.

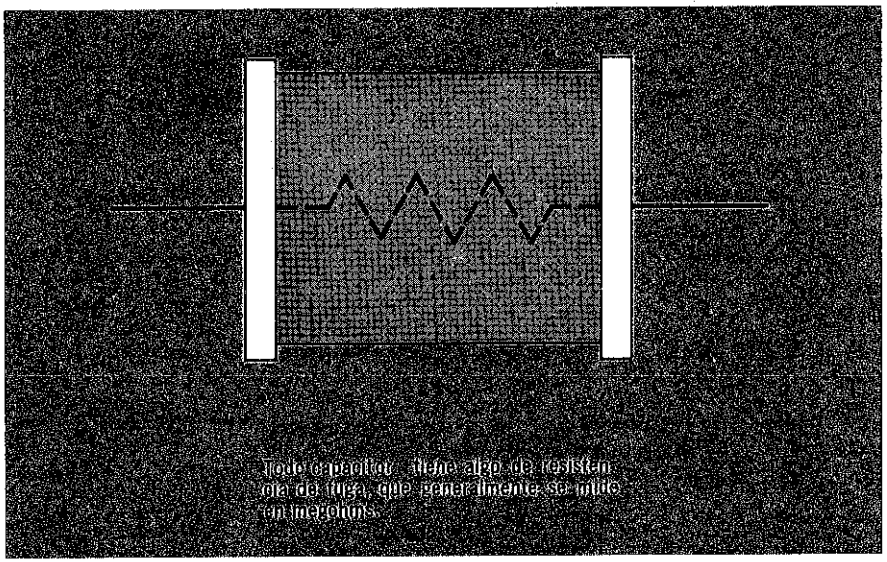


Igual que su contraparte inductiva, la reactancia inductiva, la reactancia capacitiva se expresa en *ohms*, y actúa igual que una resistencia en la limitación del flujo de corriente alterna. Cuando se conoce la reactancia capacitiva, la corriente puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$I = E/X_C$$

resistencia de fuga

Teóricamente, la corriente que fluye en un circuito capacitivo puro resulta de la carga y descarga del capacitor. El dieléctrico, que es un aislante, debe evitar el paso de cualquier corriente entre las placas, excepto cuando ocurre la ruptura si se aplica una tensión demasiado alta. Sin embargo, no existe un aislante perfecto. Aun el mejor dieléctrico tiende a conductir corriente, hasta cierto grado. Por tanto, el dieléctrico tiene un valor de resistencia alto, conocido como *resistencia de fuga*, la cual deja pasar cierta *corriente de fuga*. La resistencia de fuga tiende a reducir el valor de la capacitancia.



Sin embargo, en un buen capacitor la resistencia de fuga generalmente se mide en megohms, y puede hacerse caso omiso de ella en la mayor parte de las aplicaciones. Sin embargo, al "envejecer" el capacitor la resistencia de fuga se puede reducir al punto en que el capacitor funcionará igual que un resistor. Generalmente se encontrará que la resistencia de fuga es más baja con capacitores de alto valor que con capacitores de bajo valor. Esto se debe a que los capacitores más grandes tienen áreas de placa más amplias y están más próximas entre sí; por lo tanto, sus dieléctricos deben tener áreas grandes y ser muy delgados. Y como, según se vio en el volumen 2, la resistencia disminuye al aumentar el área transversal y disminuir la longitud o tamaño. De manera que cuanto más grande sea el capacitor, más baja será la resistencia de fuga y más alta la corriente de fuga.

capacitores en serie

La conexión de capacitores en serie disminuye la capacitancia total

Los capacitores en serie actúan como un sólo capacitor con separación entre sus placas igual a la suma de la separación de las placas de los capacitores individuales. La capacitancia total, por lo tanto, es menor que la de cualquiera de los capacitores individuales

La capacitancia total de capacitores en serie se calcula en la misma forma que la resistencia toal de resistores en paralelo. El método recíproco

$$C_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \text{etc.}}$$

o cualquiera de los métodos más cortos que se usan especialmente. La reactancia capacitiva, sin embargo, es simplemente la suma de las reactancias individuales

$$X_{C\ TOT} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \cdots + \text{etc.}$$

Para obtener un valor de capacitancia deseado, a menudo pueden conectarse los capacitores en serie. La capacitancia total de la combinación en serie es *inferior* a la capacitancia de cualquier capacitor particular. Esto se debe a que la combinación serie funciona como un capacitor *único*, cuya separación entre placas sea igual a la *suma* de las *separaciones* de que hay entre las placas de cada uno de los capacitores. Y, según se ha estudiado previamente, cuanto mayor sea la separación entre las placas, menor será la capacitancia.

La capacitancia total de *capacitores en serie* se calcula de la misma manera que la resistencia total de *resistores en paralelo* (volumen 2). Sin embargo, la reactancia capacitiva total de capacitores en serie no se encuentra de la misma manera. Puesto que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la capacitancia, si la capacitancia total de capacitores en serie disminuye, entonces la resistencia aumenta. En realidad, las reactancias de cada uno de los capacitores en serie se suman igual que resistencias en serie. También se puede encontrar la reactancia total determinando previamente la capacitancia total de la combinación en serie y luego calculando la reactancia de la capacitancia total.

La caída de tensión en cada capacitor de una combinación en serie es *directamente proporcional* a la *reactancia* de ese capacitor. La caída de tensión se puede calcular por medio de la ecuación $E = IX_C$, donde I es la corriente del circuito serie —que es *la misma* a través de cada capacitor de la combinación— y X_C es la reactancia del capacitor particular. Puesto que la caída de tensión es directamente proporcional a la reactancia capacitiva que, a su vez, es inversamente proporcional a la capacitancia, la caída de tensión también es *inversamente proporcional* a la *capacitancia*. Por lo tanto, en una combinación en serie, el capacitor con menor capacitancia tiene la mayor caída de tensión en sus terminales.

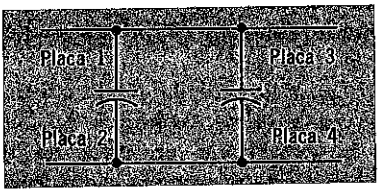
capacitores en paralelo

Cuando se conectan capacitores en *paralelo*, la capacitancia total es igual a la *suma* de cada una de las capacitancias. Esto se debe a que los capacitores en paralelo funcionan como uno solo con una *área de placas* igual a la suma de las áreas de placas de todos los capacitores. Por lo tanto, con un área de placas mayor se aumenta la capacitancia. El resultado es que la capacitancia total de capacitores en paralelo se encuentra sumando la suma de las capacitancias particulares, igual que con los resistores en serie. Por otra parte, la reactancia capacitiva total de capacitores en paralelo se comporta a la inversa. Por lo cual la reactancia total se encuentra tratando las reactancias particulares como resistores en paralelo; o se puede encontrar determinando primero la capacitancia total y luego obteniendo la reactancia correspondiente a esa capacitancia total.

Como en el caso de resistores en paralelo e inductores en paralelo, se aplica la misma tensión a cada capacitor de una combinación en paralelo; pero la corriente en cada uno difiere para diferentes valores de capacitancia.

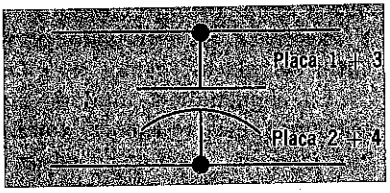
La conexión de capacitores en paralelo aumenta la capacitancia

Real

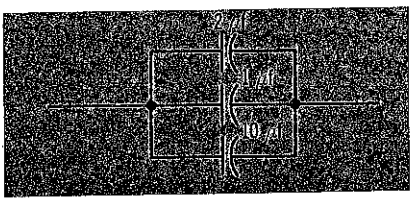


Los capacitores en paralelo actúan como un solo capacitor con un área de placas igual a la suma de las áreas individuales de placas de los capacitores

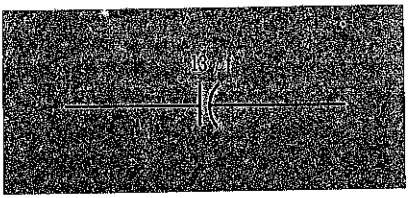
Efectiva



La capacitancia total, por lo tanto, es mayor que la de cualquiera de los capacitores individuales.



=



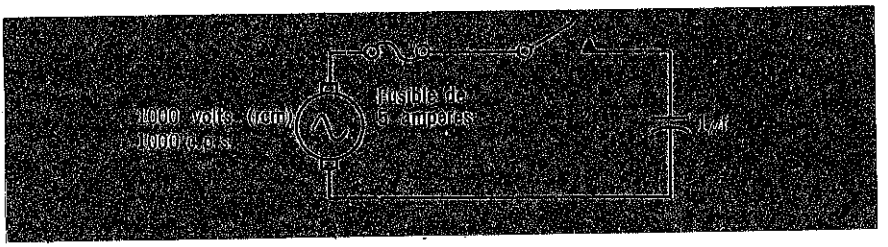
La capacitancia total de capacitores en paralelo es igual a la suma de las capacitancias de los capacitores individuales:

$$C_{TOT} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + \text{etc.}$$

La reactancia capacitiva total, en cambio, se encuentra tratando las reactancias individuales como resistencias en paralelo:

$$X_{C\,TOT} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \ldots + \text{etc.}}$$

problemas resueltos



Problema 8. ¿Se quemará el fusible del circuito cuando se cierra el interruptor?

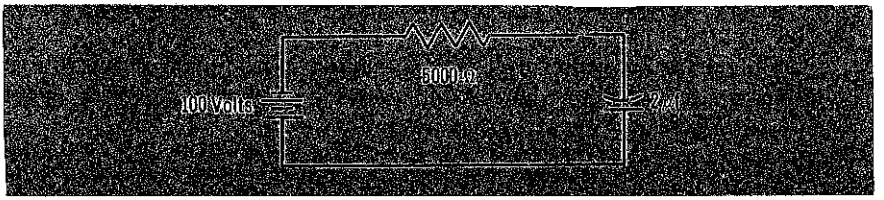
El fusible se quemará si la corriente es mayor de 5 amperes. Encuentre la corriente aplicando la ley de Ohm, después de calcular X_C.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1}{(6.28 \times 1000 \times 0.000001)} = \frac{1}{0.00628} = 159 \text{ ohms}$$

Mediante la ley de Ohm se tiene:

$$I = \frac{E}{X_C} = \frac{1000 \text{ volts}}{159 \text{ ohms}} = 6.3 \text{ amperes}$$

El fusible se quemará ya que la corriente excede a su capacidad.



Problema 9. ¿Por cuánto tiempo fluirá corriente en el circuito?

La corriente fluirá hasta que el capacitor esté totalmente cargado, lo que requiere un tiempo igual a 5 veces la constante de tiempo. La constante de tiempo es igual a la resistencia multiplicada por la capacitancia:

$$t = RC = 5000 \text{ ohms} \times 0.000002 \text{ farads} = 0.01 \text{ segundos}$$

Por lo tanto,

$$5t = 5 \times 0.01 = 0.05 \text{ segundos}$$

Problema 10. Si la tensión del circuito anterior, se aumenta a 200 volts, ¿por cuánto tiempo circulará la corriente?

Al aplicar una tensión más alta, el capacitor se cargará a una tensión más alta, pero lo seguirá haciendo en 0.05 segundos.

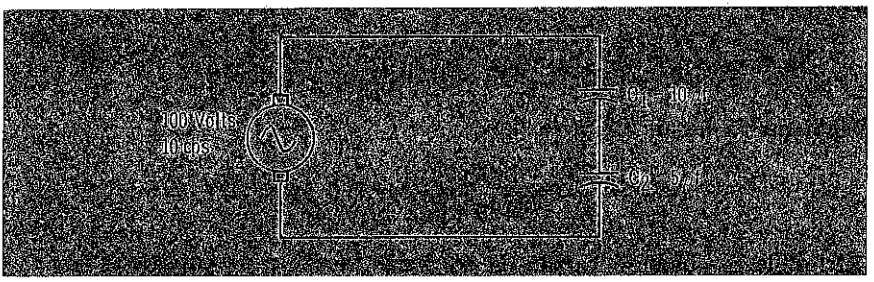
problemas resueltos (cont.)

Problema 11. ¿Cuál es la capacitancia total del circuito que se describe más adelante?

Los capacitores están en serie, de manera que se usan los mismos métodos para determinar la resistencia total de resistores en paralelo. Puesto que hay dos capacitores desiguales, es preferible usar el método producto/suma:

$$C_{TOT} = \frac{(C_1 \times C_2)}{(C_1 + C_2)} = \frac{(10\ \mu f \times 5\ \mu f)}{(10\ \mu f + 5\ \mu f)} = \frac{50\ \mu f}{15\ \mu f} = 3.33\ \mu f$$

Nótese que no era necesario convertir los valores de los capacitores de microfarads a farads. La razón es que en este problema sólo se trabajaba con capacitancia y todas las capacitancias estaban en las mismas unidades.



Problema 12. En el circuito, ¿qué capacitor tiene mayor carga en sus placas?

Puesto que la corriente es el flujo de carga y en cualquier instante es la misma en todas partes del circuito en serie, ambos capacitores deben tener la misma carga en el mismo instante.

Problema 13. ¿Qué capacitor tiene la mayor tensión en sus terminales?

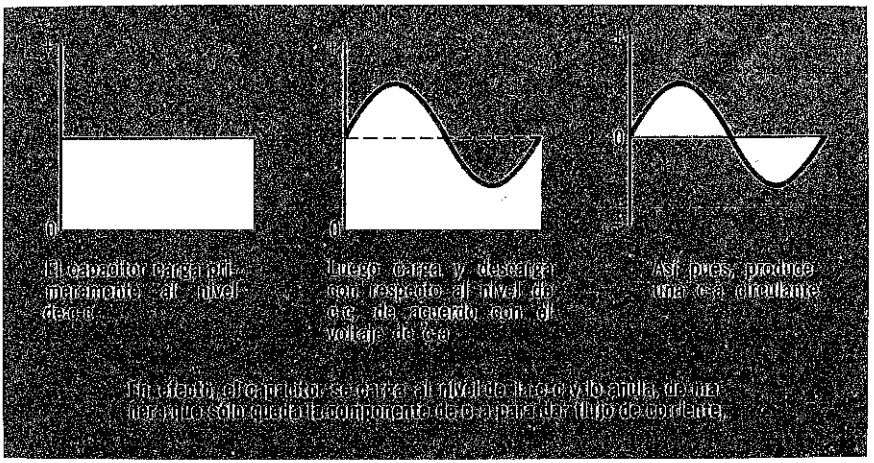
El problema se podría resolver determinando la reactancia capacitiva de los dos capacitores, usándola luego para calcular la corriente total del circuito y luego usando la corriente y la reactancia de cada uno de los capacitores para determinar la caída de tensión en cada uno de ellos. La forma más fácil de resolver el problema es reordenar el enunciado de la ecuación básica para capacitancia, $C = Q/E$

$$E = Q/C$$

Y, puesto que se sabe que la carga (Q) en ambos capacitores es la misma, esta ecuación indica que el que tenga la capacitancia más baja (C) debe tener la mayor tensión (E) en sus terminales. Esto ocurre siempre que se conectan capacitores en serie. Aquel que tiene la menor capacitancia siempre tendrá la tensión mayor en sus terminales. C_2, por tanto, tendrá una caída del doble de C_1.

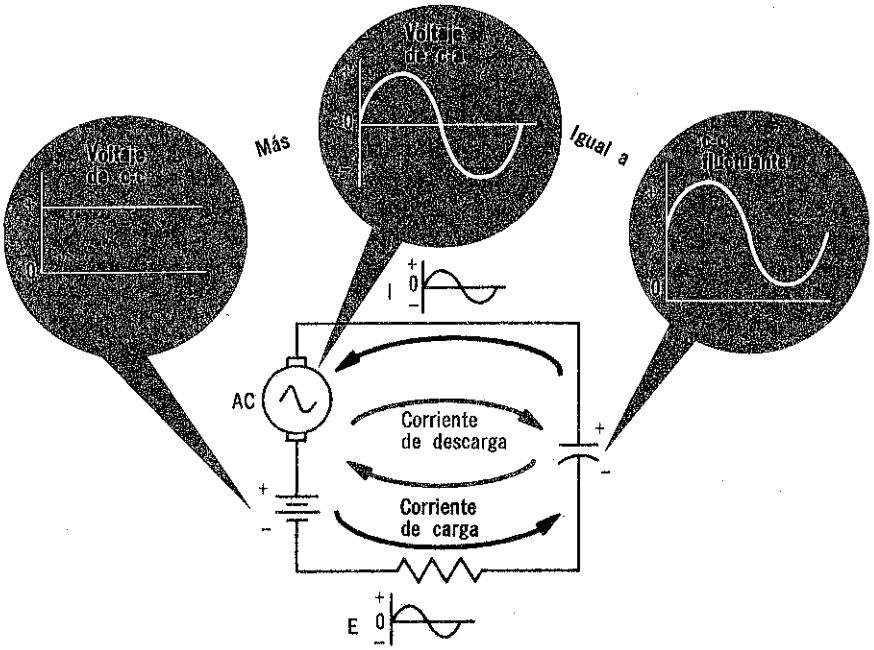
circuitos capacitivos de c-c fluctuante

Se ha visto ya que la c-c fluctuante tiene características tanto de c-a como de c-c. Consta de una componente —la *componente de c-a*— que varía en amplitud pero no en dirección, así como otra componente, la *referencia de c-c*. La referencia de c-c es un valor de c-c en torno a la cual varía la componente de c-a. Cuando se aplica una tensión fluctuante de c-c a un capacitor, el capacitor se carga casi instantáneamente al valor de la referencia de c-c. Luego se carga más y se descarga según la componente de c-a. El capacitor nunca se descarga totalmente, ya que siempre mantiene alguna carga como resultado de la referencia de c-c. La tensión máxima en el capacitor es igual al valor de la referencia de c-c más el valor pico de la componente de c-a. La tensión mínima es igual a la referencia de c-c menos el valor pico de la componente de c-a.

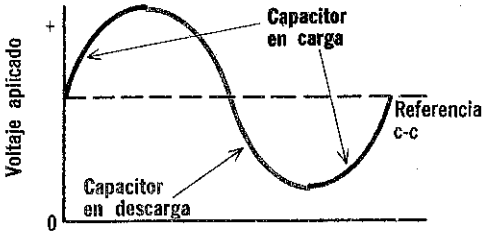


Cuando la componente de c-a está *aumentando*, el capacitor está *cargándose* y la corriente fluye en la dirección correspondiente. Cuando la componente de c-a *disminuye*, el capacitor se *descarga parcialmente*, de manera que la corriente *invierte su dirección*. De esta manera, aunque la tensión aplicada nunca cambia de dirección, la corriente del circuito lo hace cada vez que el capacitor comienza a descargarse. Por ello, la corriente del circuito se comporta como si la tensión aplicada sólo constara de la componente de c-a. En efecto, la componente de c-a está *separada* de la referencia de c-c. Así se produce una corriente alterna que varía en torno a *cero*. Si se agregara un resistor en serie con el capacitor, la componente de c-a produciría una caída en esta resistencia como una tensión que variaría con respecto a cero. Así pues, el capacitor *bloquea* la c-c y *pasa* la c-a.

circuitos capacitivos de c-c fluctuante (cont.)

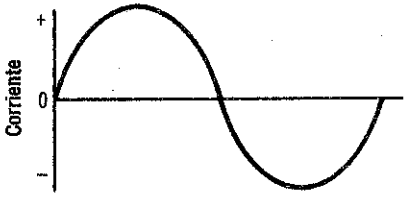


Una fuente de voltaje c-c fluctuante varía en amplitud, pero nunca invierte su polaridad. La corriente en un capacitor conectado a esta fuente, en consecuencia, no cambia de dirección



El capacitor se carga cuando el voltaje aplicado aumenta y se descarga cuando disminuye. Por lo tanto, la corriente sigue a la componente de c-a

Las variaciones de corriente siguen a la componente de c-a, pero varían con respecto a cero, en lugar de con respecto a una referencia c-c. En efecto, pues, el capacitor separa a la componente de c-a



resumen

☐ En un circuito de c-a, la tensión en un capacitor cambia constantemente de polaridad. ☐ La corriente alterna puede pasar por un capacitor debido a que el capacitor se carga y descarga alternativamente durante cada ciclo de c-a aplicada.

☐ La tensión del capacitor a menudo recibe el nombre de tensión de oposición, debido a que tiene un defasamiento de 180 grados con respecto a la tensión aplicada. ☐ La tensión en un capacitor está atrasada 90 grados con respecto a la corriente en el capacitor. O bien la corriente en un capacitor está adelantada 90 grados con respecto a la tensión aplicada. ☐ La corriente en un capacitor es directamente proporcional a la frecuencia de la tensión aplicada.

☐ La oposición que ofrece un capacitor al flujo de corriente en un circuito de c-a recibe el nombre de reactancia capacitiva y se abrevia X_C. ☐ La reactancia capacitiva se puede encontrar mediante la ecuación $X_C = 1/(2\pi fC)$. X_C se expresa en ohms. ☐ La corriente de fuga en un capacitor se debe a la resistencia de fuga, la cual es producida por el hecho de que el dieléctrico no es un aislante perfecto. ☐ La capacitancia total de los capacitores en serie es $C_{TOT} = \dfrac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \cdots + \text{etc.}}$ ☐ La capacitancia total de capacitores en paralelo es $C_{TOT} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + \text{etc.}$ ☐ Los capacitores en circuitos de c-c fluctuante bloquean la c-c, en tanto que dejan pasar la c-a.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo bloquea un capacitor la c-c?
2. ¿Cuáles son las relaciones de tensión y corriente que hay entre las tensiones del capacitor y aplicadas? ¿Cuáles son entre las corriente del capacitor y la tensión aplicada?
3. ¿Qué sucede con la corriente del capacitor si se reduce la frecuencia de la tensión aplicada?
4. ¿Cómo se le llama a la oposición que ofrece un capacitor al flujo de la corriente alterna? ¿Cuáles son sus unidades?
5. ¿Cuál es la ecuación para encontrar X_C?
6. ¿Qué significa *corriente de fuga* en un capacitor y qué la produce?
7. ¿Cuál es la capacitancia total de tres capacitores en serie, cuyos valores son 10, 10, y 5 microfarads?
8. ¿Cuál es el valor de X_C para cada capacitor de la pregunta 7 y la reactancia capacitiva total a 100 cps? ¿a 10 kc?, ¿a 1 mc?
9. ¿Cuál es la capacitancia total de tres capacitores en paralelo, cuyos valores son 10, 10 y 5 microfarads?
10. ¿Cuánto vale X_C para cada capacitor de la pregunta 9 y la reactancia capacitiva total a 100 cps?, ¿10 kc?, ¿a 1 mc?

factor de potencia

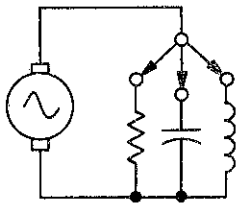
En circuitos de c-c, o circuito de c-a puramente resistivo, la potencia consumida es igual a la tensión multiplicada por la corriente o P = EI. En circuitos que contienen reactancia, sin embargo, la relación entre tensión corriente y potencia consumida no es tan sencilla. La razón es que gran parte de la potencia tomada de la fuente por inductores y capacitores, en lugar de ser consumida es temporalmente *almacenada* y luego regresada a la fuente. La potencia es almacenada en el campo magnético de los inductores y el campo electrostático de los capacitores. Si se quisiera medir la tensión y la corriente en un circuito inductivo o capacitivo y luego multiplicarlas, se obtendría una *potencia aparente*. Esta es la potencia suministrada al circuito por la fuente, pero no es la potencia consumida por el circuito, que es la *potencia real*. Para convertir potencia aparente a potencia real, debe multiplicarse la potencia aparente por el *coseno* del ángulo de fase (θ) entre la tensión y la corriente en el circuito. Matemáticamente, esto se expresa:

$$\text{Potencia real (P)} = \text{EI} \cos \theta$$

El valor de coseno θ recibe el nombre de *factor de potencia* de circuito. En un circuito puramente resistivo, la tensión y la corriente están *en fase* de manera que el ángulo de fase entre ellos es *cero*. Puesto que coseno de θ es 1, la potencia aparente es *igual* a la potencia real en circuitos resistivos. En un circuito puramente inductivo capacitivo, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente es de 90 grados. El coseno de 90 grados es cero, de manera que la potencia real es igual a la potencia aparente multiplicada por cero, la potencia real pues, es cero. Esto significa que no hay potencia consumida en el circuito. Toda la potencia tomada de la fuente es regresada a ella.

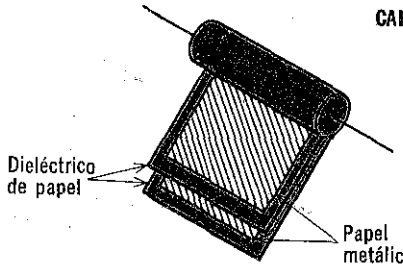
En realidad, todos los circuitos contienen cierta resistencia. En los circuitos reactivos, el efecto de la resistencia es el de *reducir* el ángulo de fase entre la tensión y la corriente. El coseno del ángulo ya no es cero y parte de la potencia tomada de la carga se consume en la resistencia de circuito. La potencia real depende entonces de las magnitudes relativas de la resistencia y la reactancia en el circuito. Esto se trata detalladamente en circuitos RL y RC en el volumen 4.

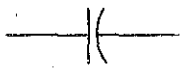
En un circuito puramente resistivo, el factor de potencia es igual a 1.0 , de manera que la potencia aparente es igual a la potencia real



En un circuito puramente inductivo o puramente capacitivo, el factor de potencia es igual a 0 de manera que no hay potencia consumida por el circuito

CAPACITORES FIJOS



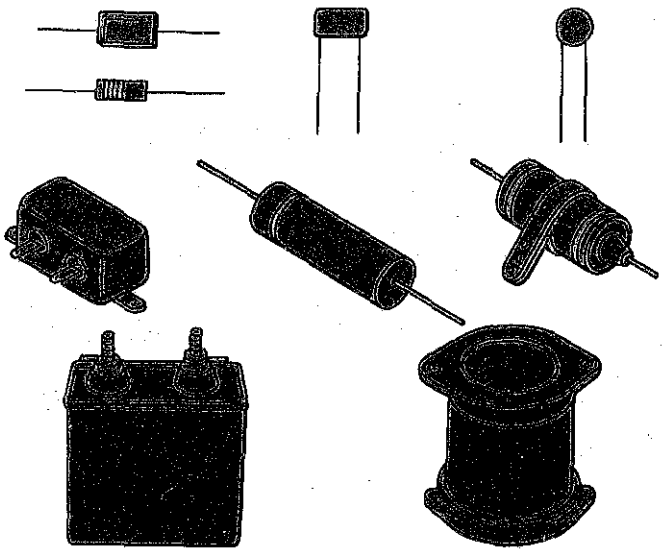


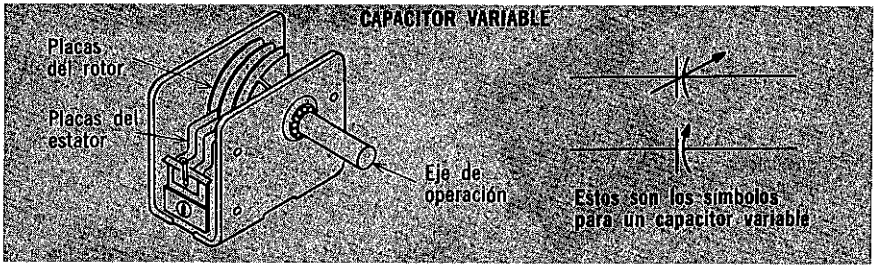
Este es el símbolo para un capacitor fijo

tipos de capacitores

Actualmente se usa una gran variedad de tipos de capacitores. Esencialmente, caen en cualquiera de dos amplias categorías: capacitores *fijos* o capacitores *variables*. Los capacitores fijos tienen su valor de capacitancia establecido *permanentemente* por su construcción y este valor no puede cambiar. Los más comunes obtienen sus nombres de los materiales dieléctricos empleados. Ejemplos de éstos son capacitores de *papel*, capacitores de *mica* y capacitores de *cerámica*. Las placas de estos capacitores generalmente están hechos de metal laminado. Con objeto de mantener su tamaño físico lo más pequeño posible, se usan técnicas como son el empleo de serie de placas separadas por material dieléctrico o enrollar placas y material dieléctrico en forma tubular, para la construcción de capacitores fijos.

Capacitores fijos típicos

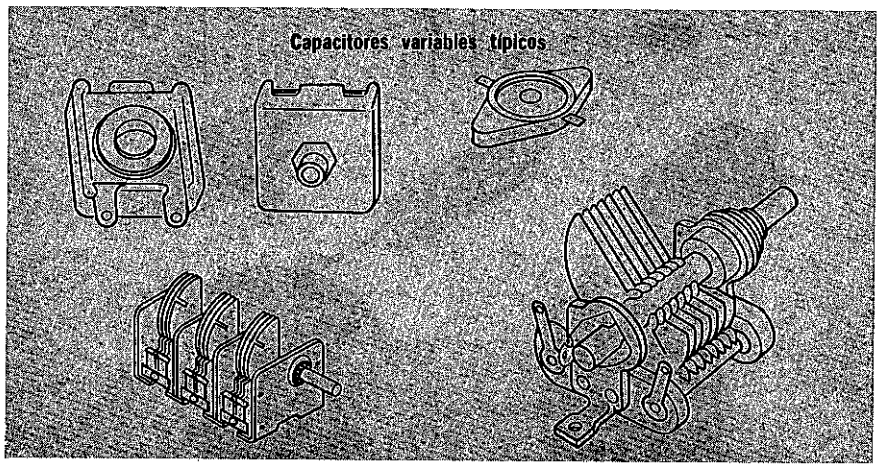




tipos de capacitores (cont.)

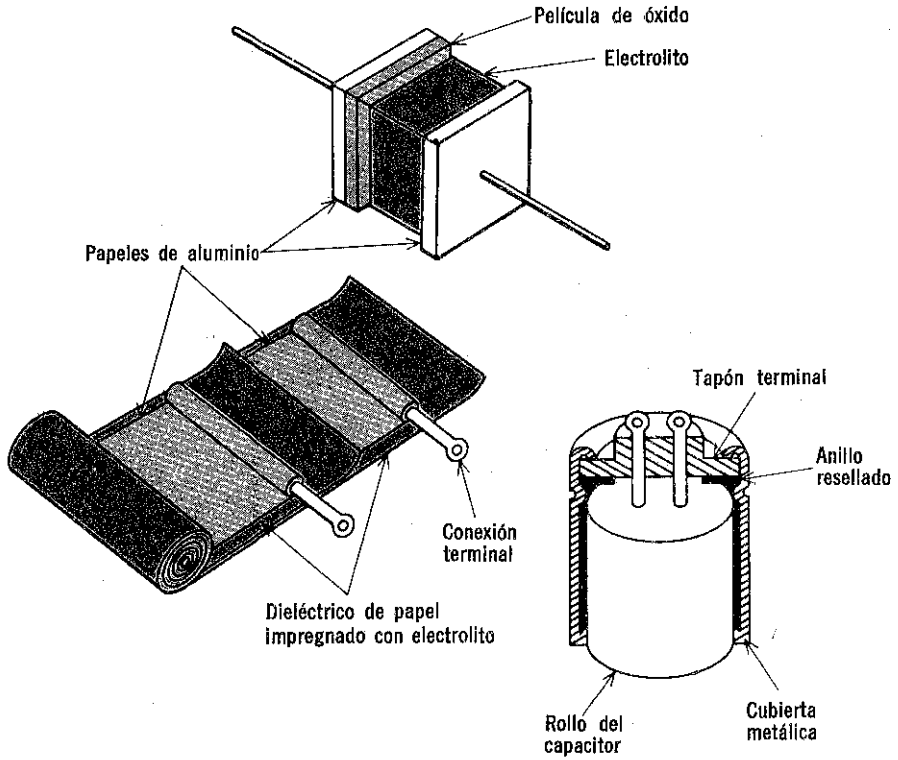
Los capacitores variables se hacen de manera que sus valores de capacitancia puedan *ajustarse continuamente* en una amplia escala. El tipo más común consiste de dos juegos de placas metálicas entrelazadas. Un juego de placas, las del *rotor,* está montado sobre un eje que, al girar, mueve a las placas, entre otro grupo de placas, placas de *estator.* Efectivamente, un grupo de placas actúa como una de las placas del capacitor y el otro como la otra placa. Cuanto mayor sea el área común a las dos placas, mayor será el *área* efectiva de las placas del capacitor y mayor su capacitancia. El aire sirve como dieléctrico entre las placas. Otro capacitor variable consta de dos placas metálicas cuya *separación* puede regularse por medio de tornillos. Generalmente, se usa mica entre las placas de este tipo de capacitor variable.

La mayor parte de los capacitores se marcan con la tensión de trabajo de c-c (WVDC), o sea la tensión *máxima* de c-c que pueda aplicarse sin peligro al capacitor. Si se excede esta tensión, puede resultar la ruptura del dieléctrico, con lo cual deja de ser útil el capacitor.



capacitor electrolítico

Los capacitores que se han descrito se limitan generalmente a valores inferiores a 1 μf debido a consideraciones de tamaño y costo. A valores mayores, se usan capacitores especiales llamados *capacitores electrolíticos.* Se pueden obtener así capacitancias del orden de varios miles de microfarads, con capacitores electrolíticos, a un costo y con un tamaño razonables. Existen dos tipos básicos de construcción que se usan en los capacitores electrolíticos; el *tipo húmedo* y *tipo seco.* El tipo húmedo actualmente ha dejado de usarse, de manera que sólo se describirá el tipo seco.

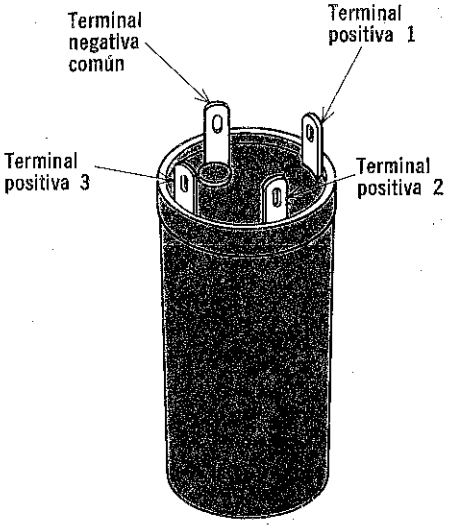


Esencialmente, un capacitor electrolítico de tipo seco consta de dos hojas de aluminio separadas por una capa de papel saturado con un líquido químico que se llama *electrólito.* Las tres láminas están enrolladas y selladas en un recipiente. Durante la fabricación del capacitor, se aplica una tensión entre las dos hojas de aluminio. La corriente resultante causa la formación de una *capa de óxido,* delgada, en una hoja de aluminio, y como resultado, el capacitor queda *polarizado.*

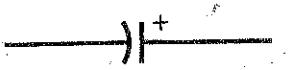
capacitor electrolítico (cont.)

La lámina de aluminio con la capa de óxido es positiva y sirve como placa positiva de capacitor. La capa de óxido tiene propiedades aislantes y sirve como dieléctrico para el capacitor. El electrólito es la placa negativa del capacitor y la segunda lámina de aluminio simplemente suministra la conexión entre el electrólito y los circuitos externos.

Puesto que el capacitor electrolítico está polarizado, sólo se puede usar en circuitos que contengan *tensión continua fluctuante*. Además, las terminales positiva y negativa de los capacitores electrolíticos se deben conectar a puntos del circuito de la misma polaridad (negativo a negativo y positivo a positivo). La razón es que el capacitor electrolítico actúa como capacitor sólo en una dirección de tensión aplicada. En la otra dirección, el capacitor electrolítico se conduce como un resistor de bajo valor.



En la construcción de capacitores electrolíticos, es común el colocar varias placas positivas en un solo recipiente. Entonces el electrolito y una sola placa negativa sirven para todas las placas positivas. De esta manera, pueden estar contenidos dos o tres capacitores en una sola unidad

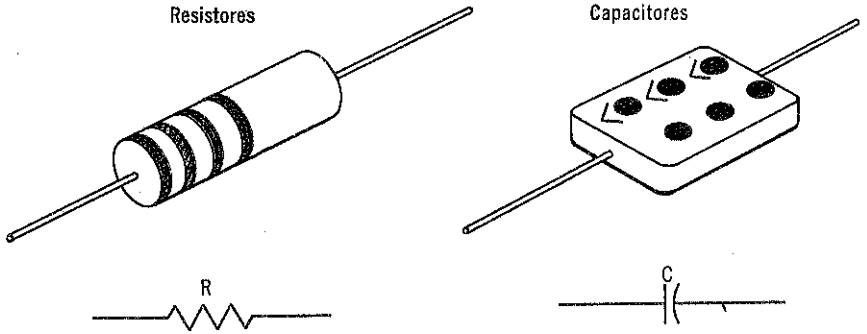


El símbolo para un capacitor electrolítico señala la polaridad

De hecho, si se conecta un capacitor electrolítico al revés, puede "explotar", debido a la alta corriente que se produciría. Existen capacitores electrolíticos especiales para usarse en circuitos de c-a. En estos capacitores se usan dos placas positivas, lo cual permite una inversión de polaridad de la tensión aplicada. Esencialmente, este tipo consta de dos condensadores electrolíticos conectados extremo con extremo.

Los capacitores electrolíticos del tipo húmedo son similares en su construcción a los de tipo seco. La diferencia principal estriba en que usan electrólitos líquidos. El capacitor electrolítico tiene una resistencia de fuga mucho más baja que los capacitores ordinarios.

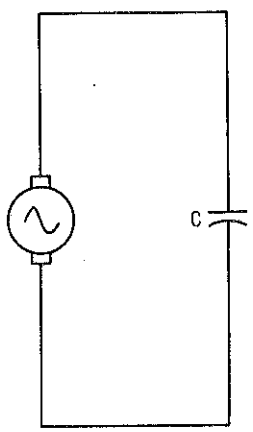
Los circuitos RC contienen



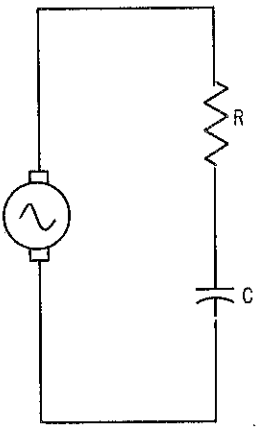
circuitos RC

Los capacitores y la capacitancia se han descrito hasta ahora desde el punto de vista de sus efectos en circuitos que *no contengan resistencia.* Sin embargo, como se sabe, todo circuito contiene cierto grado de resistencia, aunque sea solamente la resistencia del alambrado del circuito y la resistencia interna de la fuente. Cuando la resistencia del circuito es muy baja, comparada con la reactancia capacitiva, la resistencia generalmente puede pasarse por alto como ha ocurrido en este volumen. Sin embargo, cuando la resistencia es notable, debe ser considerada.

Los circuitos que contienen resistencia (R) y capacitancia (C) reciben el nombre de *circuitos RC.* Las relaciones entre resistencia y capacitancia en circuitos RC y su efecto conjunto en operación de circuitos, se tratan en el volumen 4.



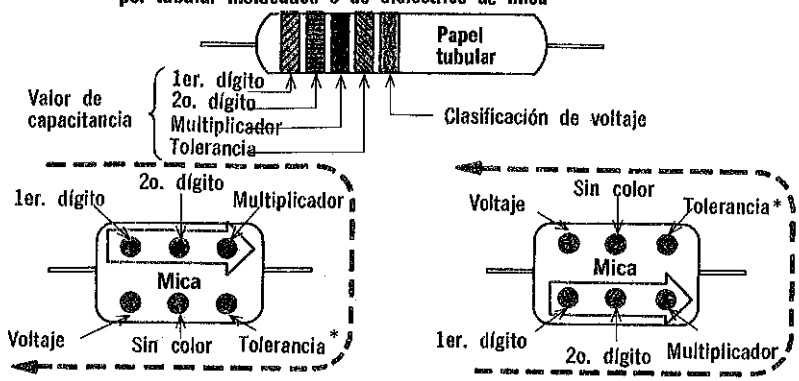
Ningún circuito contiene sólo capacitancia, ya que la fuente de energía tiene alguna resistencia interna, como también la tiene el alambrado del circuito. Esta resistencia generalmente se representa por medio de una resistencia en serie con la capacitancia. Si el valor de la resistencia es significativo, se forma un circuito RC



códigos de colores para capacitores

Todos los capacitores están marcados de alguna manera con su valor de capacitancia. Además, algunas veces se indican otras características importantes, como son tensión de trabajo y tolerancia. Cuando es práctico, esta información se imprime sobre el capacitor. En muchos casos, sin embargo, no es práctico hacerlo y se usa en su lugar un sistema de *marcas de color*. La interpretación de estas marcas de color constituyen los *sistemas de codificación de color* de capacitores. Estas se asemejan a los sistemas de código de color de resistores descritos en el volumen 2. Sin embargo, los códigos de color de capacitores no están perfectamente normalizados, de manera que conviene obtener el código utilizado por los fabricantes específicos.

Sistema de código de 5 puntos y banda para capacitores de papel tubular moldeados o de dieléctrico de mica



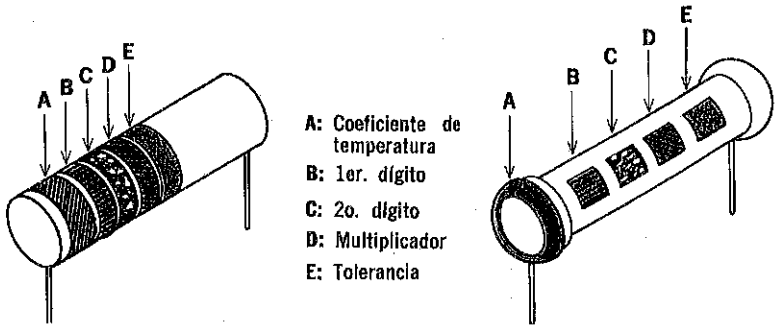
Algunas veces se usa un sistema de seis colores. En este caso, el tercer color representa al tercer dígito y el resto del código es el mismo

SISTEMA DE CODIGO DE COLORES

Color	Primer dígito	Segundo dígito	Multiplicador	Tolerancia	Clasificación de tensión (Volts)
Negro	0	0	1	±20	100
Café	1	1	10	±1	200
Rojo	2	2	100	±2	300
Naranja	3	3	1,000	±3**	400
Amarillo	4	4	10,000	±4**	500
Verde	5	5	100,000	±5	600
Azul	6	6	1,000,000	±6	700
Violeta	7	7	10,000,000	±7	800
Gris	8	8	100,000,000	±8	900
Blanco	9	9	1,000,000,000	±9	1,000
Oro	—	—	0.1	±5	2,000
Plata	—	—	0.10	±10	—

* La ausencia de color para punto de tolerancia indica una tolerancia de ±20%.
** Multiplicar por 10 para capacitores tubulares de papel.

Sistema de código de color para algunos capacitores de cerámica



códigos de colores para capacitores (cont.)

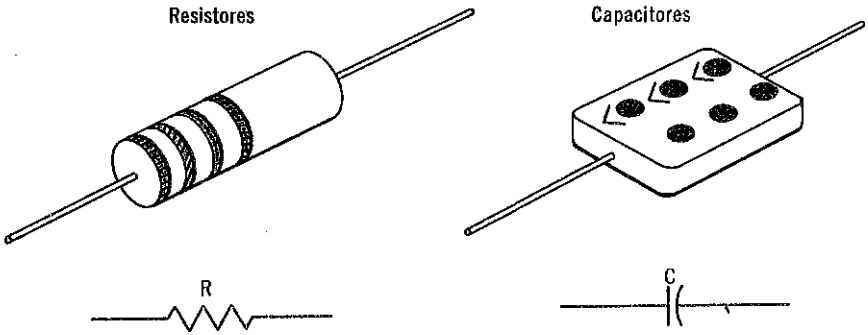
La banda de coeficiente de temperatura se identifica por ser más ancha que las otras bandas. Algunas veces, esta banda es la última. Cuando lo es, sin embargo, el resto del código sigue siendo el mismo. Además, la banda de tolerancia puede no existir. Si se usan seis bandas, existe un tercer dígito. La ausencia de banda de tolerancia significa que ésta es de 20%.

El coeficiente de temperatura indica el cambio de temperatura en partes por millón que tendrá lugar por cada grado de elevación en la temperatura de operación del capacitor sobre 20°C. Un signo menos significa que la capacitancia disminuirá en tanto que un signo más indica que aumentará. Todos estos capacitores están clasificados a 500 WVDC, a menos que se indique otra cosa.

SISTEMA DE CODIGO DE COLOR

Color	Primer dígito	Segundo dígito	Multiplicador	Tolerancia pf más de 10%	Tolerancia pf menos de 10%	Coeficiente de temperatura
Negro	0	0	1.0	±20	±2	0
Café	1	1	10	±1	—	−30
Rojo	2	2	100	±2	—	−80
Naranja	3	3	1,000	±3	—	−150
Amarillo	4	4	10,000	±4	—	−220
Verde	5	5	—	±5	±0.5	−330
Azul	6	6	—	±6	—	−470
Violeta	7	7	—	±7	—	−750
Gris	8	8	0.01	±8	±0.25	+30
Blanco	9	9	0.1	±10	±1	+120 a −750
Oro	—	—	0.1	±5	—	—
Plata	—	—	0.01	±10	—	—

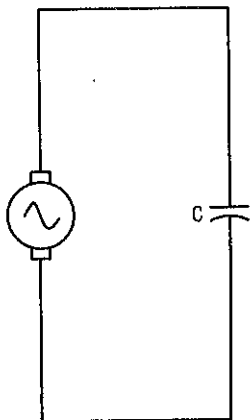
Los circuitos RC contienen



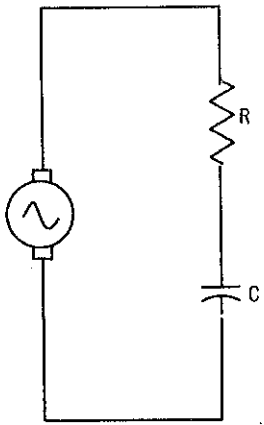
circuitos RC

Los capacitores y la capacitancia se han descrito hasta ahora desde el punto de vista de sus efectos en circuitos que *no contengan resistencia.* Sin embargo, como se sabe, todo circuito contiene cierto grado de resistencia, aunque sea solamente la resistencia del alambrado del circuito y la resistencia interna de la fuente. Cuando la resistencia del circuito es muy baja, comparada con la reactancia capacitiva, la resistencia generalmente puede pasarse por alto como ha ocurrido en este volumen. Sin embargo, cuando la resistencia es notable, debe ser considerada.

Los circuitos que contienen resistencia (R) y capacitancia (C) reciben el nombre de *circuitos RC.* Las relaciones entre resistencia y capacitancia en circuitos RC y su efecto conjunto en operación de circuitos, se tratan en el volumen 4.



Ningún circuito contiene sólo capacitancia, ya que la fuente de energía tiene alguna resistencia interna, como también la tiene el alambrado del circuito. Esta resistencia generalmente se representa por medio de una resistencia en serie con la capacitancia. Si el valor de la resistencia es significativo, se forma un circuito RC



resumen

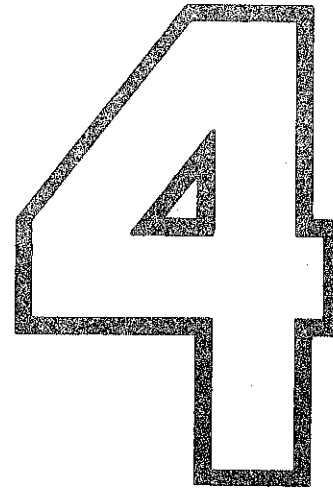
☐ El factor de potencia de un circuito es el coseno del ángulo de fase (θ) entre la tensión y la corriente. Puede variar entre 0 y 1, según el circuito. ☐ La potencia efectiva consumida en un circuito recibe el nombre de potencia real. ☐ La potencia aparente es la potencia suministrada al circuito, por la fuente. Es igual a la tensión de la fuente multiplicada por la corriente que entrega la fuente. ☐ Se puede determinar la potencia real en un circuito multiplicando la potencia aparente por el factor de potencia.

☐ Los capacitores pueden ser fijos o variables. ☐ Algunos tipos de capacitores fijos: papel, mica y cerámica. ☐ Los capacitores variables incluyen al tipo de placas rotatorias, que emplea el aire como dieléctrico; el tipo de ajuste de tornillo, con mica como dieléctrico. ☐ La máxima tensión de c-c que puede resistir sin peligro un capacitor se abrevia WVDC.

☐ El capacitor electrolítico es polarizado, y se debe insertar en un circuito con la polaridad apropiada. Los capacitores electrolíticos especiales, que tienen altos valores de capacitancia, pueden obtenerse para ser usados en circuitos de c-a. ☐ Los códigos de color de capacitores hacen posible identificar características importantes. Estas características incluyen: valor de capacitancia, tolerancia, clasificación de tensión y coeficiente de temperatura.

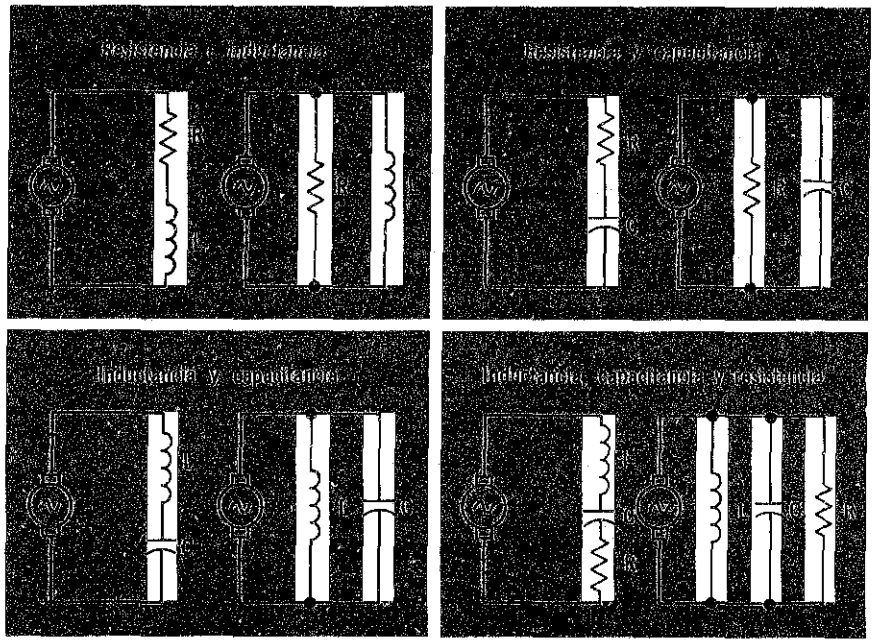
preguntas de repaso

1. ¿Qué significa el *factor de potencia* de un circuito?
2. La potencia aparente en un circuito de 50 voltamperes, y la potencia real es de 40 watts. ¿Cuál es el factor de potencia?
3. ¿Por qué se conoce a los capacitores de papel, mica y cerámica, con esos nombres? ¿Son esos capacitores fijos o variables?
4. ¿Qué significa la abreviatura WVDC que se encuentra en un capacitor?
5. ¿Qué es un *capacitor electrolítico*? ¿Puede usarse alguna vez un circuito de c-a?
6. ¿Cómo se identifican los capacitores?
7. ¿Qué significa *placas de rotor* y *de estator*? ¿Contienen éstas los capacitores fijos?
8. ¿Por qué son importantes las polaridades de los capacitores electrolíticos? ¿Pueden usarse siempre estos capacitores para c-c? ¿Pueden usarse para c-a?
9. El factor de potencia de un circuito es 0.5. ¿Cuál es el ángulo de fase entre la tensión y la corriente?
10. ¿Cuál es el factor de potencia en un circuito capacitivo puro? ¿Cuál es un circuito resistivo?



Vectores — Circuitos RL — Circuitos en serie RL — Circuitos en paralelo RL — Comparación de circuitos RL en serie y en paralelo — Circuitos RC — Circuitos en serie RC — Circuitos en paralelo RC — Comparación de circuitos RC en serie y en paralelo — Circuitos LCR — Circuitos en serie LC — Circuitos en serie LCR — Resonancia en serie — Circuitos en paralelo — Circuitos en paralelo LCR — Resonancia en paralelo — Comparación de circuitos resonantes en serie y en paralelo — Circuitos en serie y paralelo, RL, RC y LCR — Circuitos sintonizados — Circuitos de filtro — Vectores de transformadores — Acoplamiento de impedancia.

Este volumen trata de circuitos que contienen:



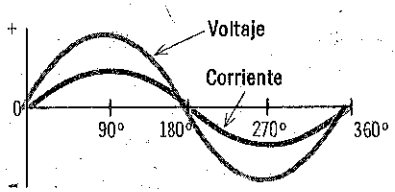
introducción

En el volumen 3 se han estudiado las propiedades de la corriente alterna así como la manera en que se emplea. También se han considerado la inductancia y la capacitancia, y se ha explicado cómo se analizan los circuitos de c-a que poseen resistencia, inductancia o capacitancia. Sin embargo, el volumen 3 se limitó a tratar de circuitos que poseían sólo una de dichas propiedades. No se trató de circuitos que tuvieran dos de ellas; por ejemplo resistencia y capacitancia o resistencia e inductancia, ya no se diga de los circuitos con tres. Estos circuitos, más complejos, son el tema principal de este volumen. Se estudiará la manera de analizar y resolver circuitos que contienen combinaciones, tanto en serie como en paralelo, de resistencia e inductancia; resistencia y capacitancia; inductancia y capacitancia, así como de inductancia, capacitancia y resistencia. Se considerarán también algunas de las aplicaciones específicas de estos circuitos.

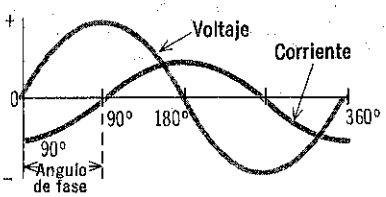
Gran parte del material de este volumen se basa en las *relaciones de fase* entre las tensiones y corrientes en los diversos circuitos. Estas relaciones se pueden explicar más fácilmente si se emplean vectores para representarlas. Por lo tanto, antes de describir los circuitos físicos se hará una exposición elemental acerca de los vectores y su utilidad en el estudio de la electricidad.

repaso de ángulos de fase LCR

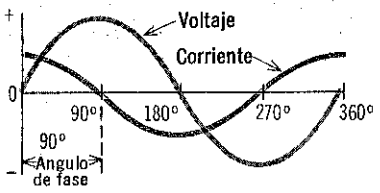
Según se ha dicho en el volumen 3, la expresión *ángulo de fase* se usa para expresar la relación de *tiempo* existente entre tensión y corriente alterna, así como para especificar una *posición* o *punto* con respecto al tiempo para una tensión o corriente alterna. Por ejemplo, si dos tensiones son de polaridad opuesta en cada instante, entonces estarán defasadas 180 grados, es decir, el ángulo de fase entre ellas es de 180 grados. De manera similar, si una corriente llega a su amplitud máxima al cabo de un cuarto de su ciclo, o sea a los 90 grados, se dice que alcanza su máxima amplitud a un ángulo de fase de 90 grados.



Circuito exclusivamente resistivo



Circuito exclusivamente inductivo



Circuito exclusivamente capacitivo

En el circuito exclusivamente resistivo, el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje es cero. En un circuito exclusivamente inductivo, el ángulo de fase es 90° y el voltaje está adelantado. En un circuito exclusivamente capacitivo, el ángulo de fase es 90° y la corriente adelantada

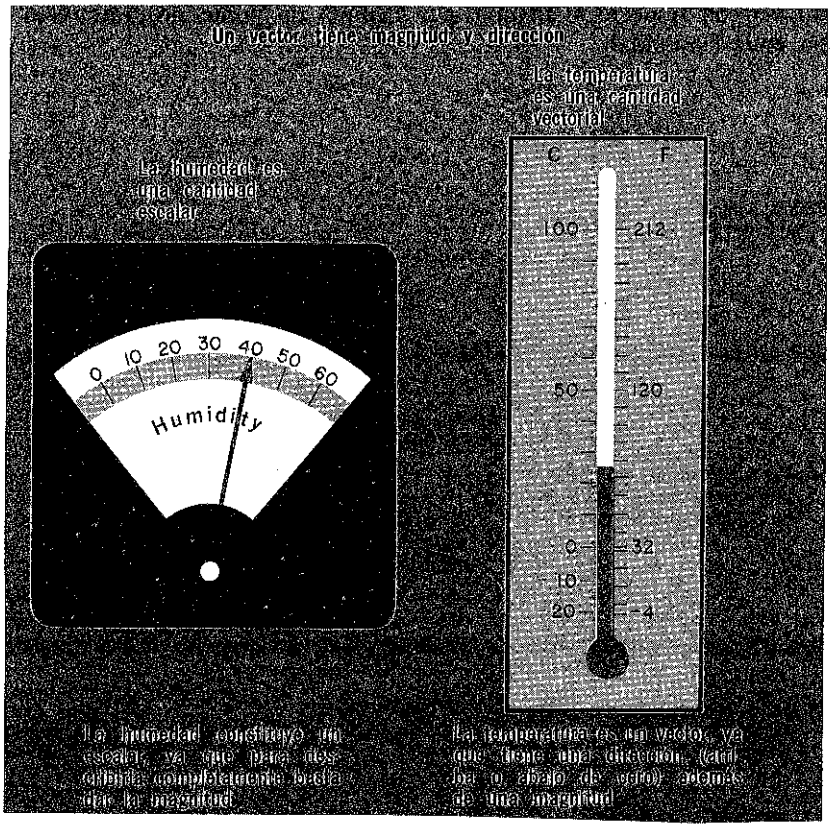
También se ha dicho en el volumen 3 que las relaciones de fase entre la *tensión aplicada* y la *corriente del circuito* son muy bien definidas en los circuitos puramente resistivos, puramente inductivos y puramente capacitivos. Estas relaciones se pueden resumir como sigue:

1. En un circuito exclusivamente *resistivo*, la tensión y la corriente están en *fase*.
2. En un circuito exclusivamente *inductivo*, la *tensión* aplicada está adelantada 90 grados con respecto a la *corriente*.
3. En un circuito exclusivamente *capacitivo* la corriente está *adelantada* 90 grados con respecto a la *tensión* aplicada.

Ya se sabe que estas relaciones se pueden representar trazando las *ondas* de la tensión y la corriente. Sin embargo, existe otra manera que a menudo resulta más fácil de expresar las mismas relaciones. Esta consiste en emplear *vectores*.

¿qué es un vector?

Toda cantidad física tiene *magnitud*. Las expresiones tales como "5 manzanas", "5 días" y "5 ohms", todas expresan cantidades físicas, cada una de las cuales queda *completamente* determinada por el número 5. Sin embargo, existen algunas cantidades que *no* quedan completamente determinadas si sólo se dan sus magnitudes. Dichas cantidades tienen una dirección además de tener magnitud, y, si no se indica la dirección,

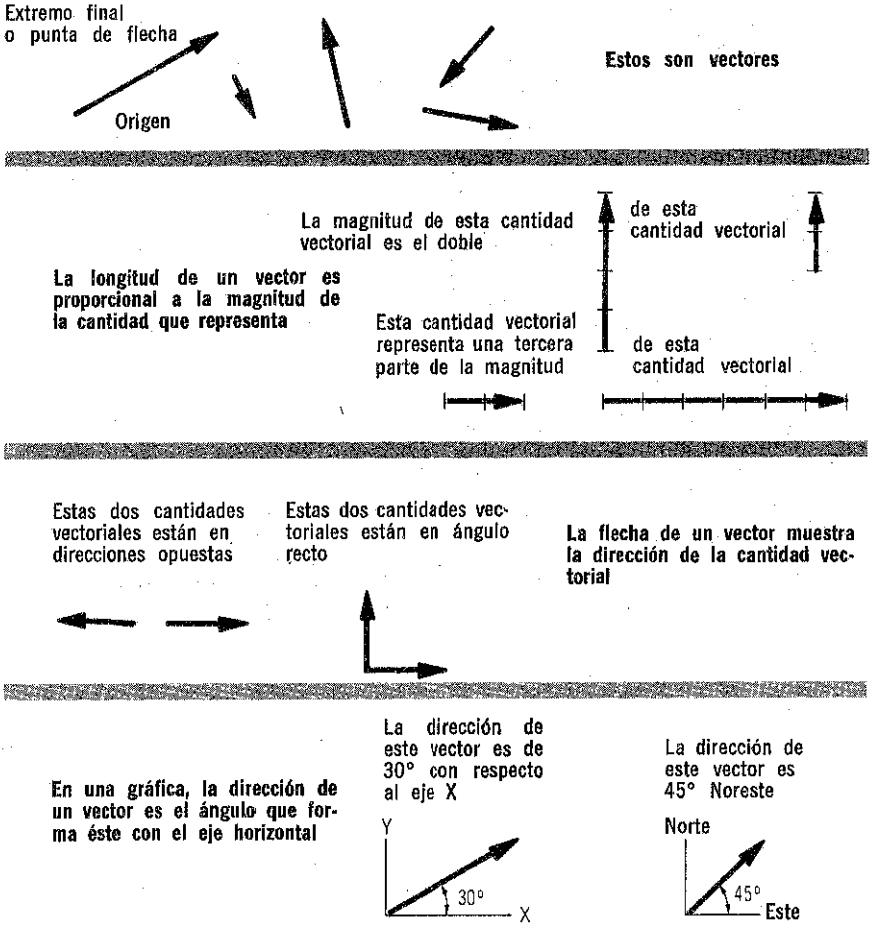


las cantidades resultan carentes de significado. Por ejemplo, si alguien le pregunta cómo ir en coche de Chicago a Milwaukee, y le dice que conduzca 130 kilómetros, esto carecería de significado. Pero si le dice que viaje 130 kilómetros *hacia el norte*, las indicaciones serían completas porque la cantidad "130 kilómetros al norte" tiene una magnitud de 130 y una dirección norte.

Las cantidades que sólo tienen magnitud, reciben el nombre de *escalares*. Las que tienen magnitud y dirección, se llaman *vectores*.

representación gráfica

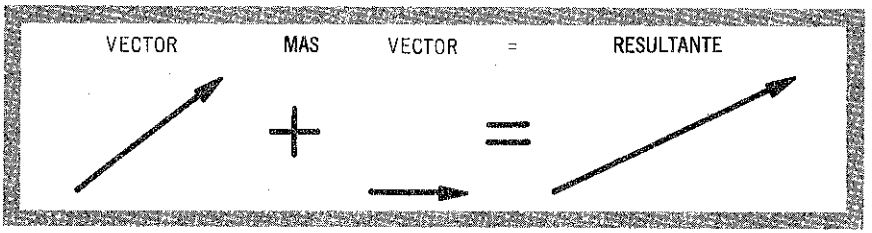
Para representar gráficamente un vector se traza una *línea recta* con una punta de flecha en el extremo. La *longitud* de la línea es proporcional a la *magnitud* de la cantidad vectorial y la *flecha* indica la *dirección*. Cuando se dibuja un vector en una gráfica, la dirección del vector generalmente se representa por el *ángulo* que forma con el eje *horizontal*. El eje horizontal sirve, pues, como *línea de referencia* desde la cual se mide la dirección del vector. Más adelante se verá que este punto de referencia puede ser una dirección, como por ejemplo norte, o una posición con respecto al tiempo, por ejemplo un punto de grado cero de una onda sinusoidal.

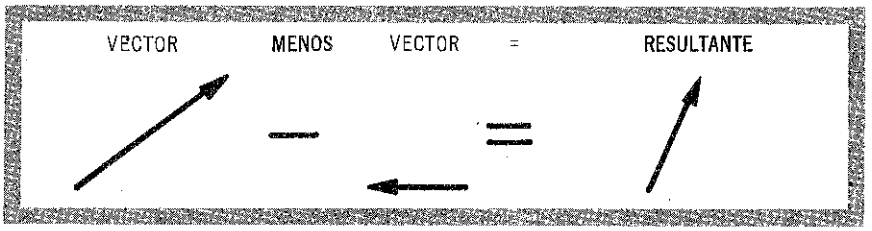


operaciones con vectores

Como los vectores representan cantidades físicas, se pueden sumar, restar, multiplicar y dividir igual que otras cantidades físicas. Para los cálculos que se efectúan en esta parte del curso, sólo se emplean la *adición* y *sustracción* de vectores. Debido a esto no se estudiarán en este volumen la multiplicación y la división de vectores.

Las cantidades vectoriales se pueden sumar y restar

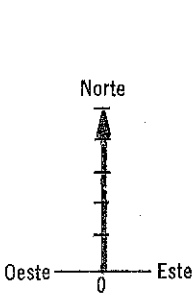




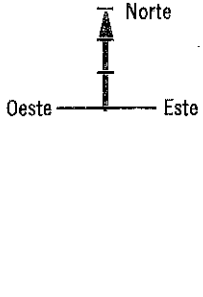
Cuando los vectores se suman o restan, el resultado es también un vector y recibe el nombre de vector resultante o simplemente resultante

Los métodos que se usan para sumar y restar cantidades escalares *no pueden* aplicarse a las cantidades vectoriales. Debido a que los vectores tienen dirección además de magnitud, hay que sumarlos y restarlos *geométricamente*. Esto significa que para sumar y restar vectores hay que usar la geometría así como las suma y resta *algebraicas*.

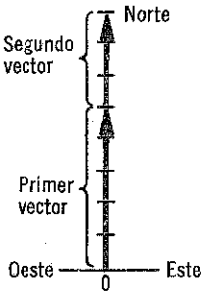
Hay varios métodos que se pueden usar cuando se suman o restan vectores. La selección del método que se use depende de las direcciones relativas de los vectores en cuestión.



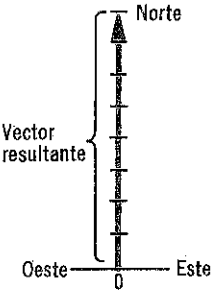
El auto va 5 km al Norte



El auto va 3 km más al Norte



Las longitudes individuales se suman, colocando el origen de una flecha sobre la punta de la otra.

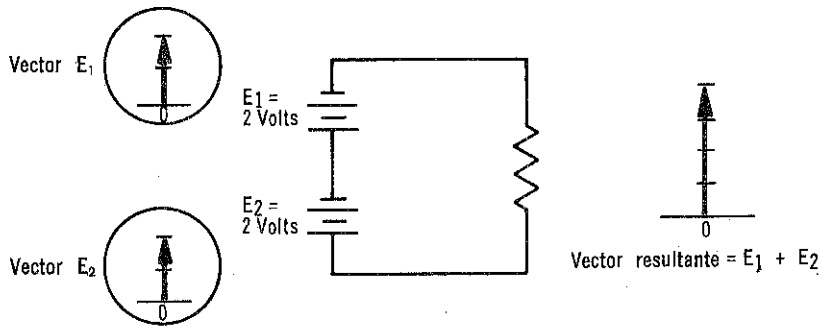


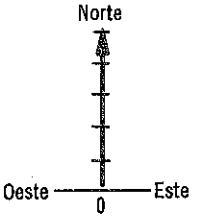
La longitud del vector resultante es igual a la suma de las longitudes individuales y tienen la misma dirección

suma de vectores con la misma dirección

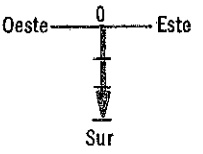
Para sumar vectores que tengan la *misma* dirección, simplemente se *suman* las *magnitudes* de cada uno. Esto da la magnitud de la resultante. Su dirección es *la misma* que la dirección de cada vector. Un ejemplo de esto es un automóvil que viaja hacia el norte 8 kilómetros a partir del punto inicial. Este movimiento puede representarse por un vector que señala al norte y tiene una longitud correspondiente a 8 kilómetros. Si ahora el vehículo recorre 5 kilómetros más, en dirección norte, su movimiento en el trayecto adicional se puede representar por otro vector. Este vector también señalará hacia el norte, pero su longitud corresponderá a 5 kilómetros. El movimiento total del vehículo, es decir, su posición final, se determina sumando las longitudes de los dos vectores y asignando a la resultante una dirección norte. En este ejemplo la resultante indica que el automóvil ha recorrido un total de 13 kilómetros hacia el norte contando desde el punto inicial.

Las baterías conectadas en serie acumulativa son un ejemplo de suma de vectores que tienen la misma dirección

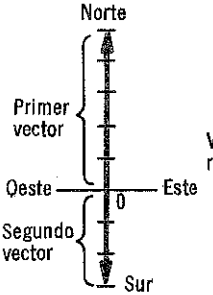




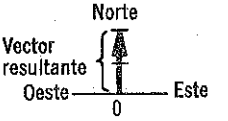
El auto viaja 5 km al Norte



Luego el auto viaja 3 km al Sur



Ambos vectores se trazan en la misma gráfica, con sus orígenes en el punto de referencia cero

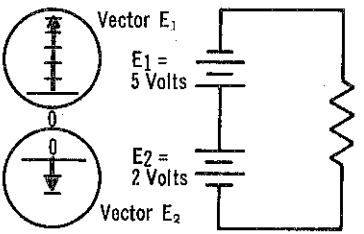


La longitud del vector resultante es la diferencia entre las longitudes individuales y tienen la dirección de la mayor

suma de vectores con direcciones opuestas

Para sumar cantidades vectoriales con direcciones *opuestas*, se *resta* la de *menor* magnitud, de la que tiene *mayor* magnitud. Esto da la magnitud de la resultante. La *dirección* de la resultante es la misma que la del vector *mayor*. Se puede ver de esto que si se suman dos vectores que tienen la misma magnitud pero dirección opuesta, la resultante es cero.

Un ejemplo de la suma de vectores con direcciones opuestas se ilustra en seguida: Si un automóvil viaja 8 kilómetros hacia el norte, el vector que representa el movimiento señalará hacia el norte y su longitud corresponderá a 8 kilómetros. Si el automóvil viaja 5 kilómetros hacia el sur, el vector que representa su movimiento en este otro trayecto señalará hacia el sur y su longitud corresponderá a 5 kilómetros. La resultante de estos dos movimientos se encuentra sumando los dos vectores. Como sus direcciones son opuestas, esto se hace restando el vector más pequeño (5 kilómetros) del mayor (8 kilómetros) y asignando a la resultante la dirección del vector mayor (norte). La resultante muestra entonces que, después de los dos movimientos, el vehículo está en una posición de 3 kilómetros al norte del punto inicial.



Las baterías conectadas en serie y en oposición constituyen un ejemplo de suma de vectores con direcciones opuestas

Vector resultante = $E_1 + E_2$

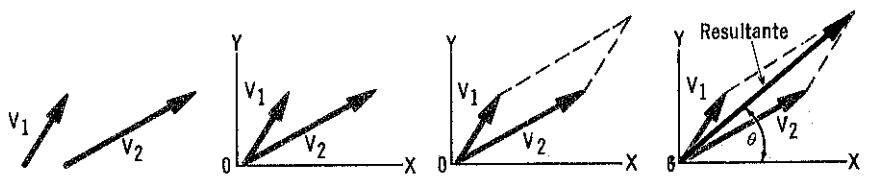
suma de vectores por el método del paralelogramo

Cuando los vectores no tienen la misma dirección ni direcciones opuestas, es posible sumarlos *gráficamente* y encontrar su resultante por medio del *método del paralelogramo de vectores.* Según se estudia en matemáticas, un paralelogramo es una figura de *cuatro lados,* cuyos lados opuestos son *iguales* en longitud y *paralelos* entre sí. Para sumar dos vectores, según el método del paralelogramo, los vectores primeramente deben colocarse de tal modo que sus orígenes coincidan. Así se obtienen dos de los lados de un paralelogramo y a continuación se lo completa. La *diagonal* del paralelogramo así construido, desde el origen de los vectores es la *resultante* de los dos vectores. La longitud de la diagonal es la longitud de la resultante y el ángulo entre la diagonal y el eje horizontal (θ) representa la dirección de la resultante.

Se puede usar el método del paralelogramo para sumar más de dos vectores. Para ello, primeramente, se determina, la resultante de dos cualesquiera de los vectores. Luego se usa esta resultante con uno de los vectores restantes y se determina la resultante de esta combinación. Entonces, la nueva resultante se usa con otro vector y así sucesivamente, hasta que se haya determinado la resultante general para todos los vectores.

Se puede ver que el método del paralelogramo es principalmente un método gráfico para la suma de vectores. Requiere del uso de una regla y un transportador pero, en el mejor de los casos, su precisión es mediana, a menos que se haga la gráfica con gran cuidado. Por esta razón, se verá que en el estudio de la electricidad, muy rara vez se usa el método del paralelogramo para obtener soluciones numéricas de los problemas relativos a la adición de vectores. Sin embargo es importante conocerlo, ya que con frecuencia se usa para analizar y describir relaciones entre cantidades vectoriales.

Método del paralelogramo



(A) Para sumar dos vectores

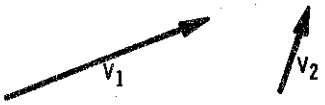
(B) primeramente, colóquelos con sus orígenes coincidentes

(C) luego, construya un paralelogramo usando los vectores como los de los lados de la figura

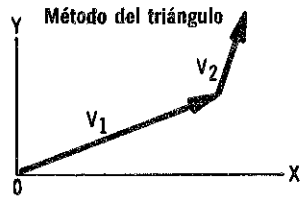
(D) La diagonal del paralelogramo es la resultante. La longitud de la diagonal es la magnitud de la resultante y el ángulo θ es su dirección

suma de vectores por el método del triángulo

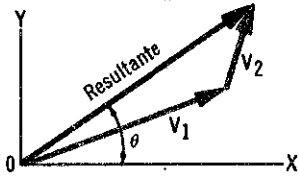
Otro método para sumar vectores *gráficamente*, recibe el nombre del *método del triángulo de vectores*. Como lo indica su nombre, el método del triángulo consiste en construir un triángulo para determinar el vector resultante. Cuando se usa este método para sumar dos vectores, primeramente se colocan los vectores uno a continuación de otro. Luego, se traza una recta que conecta el *origen* del *primer* vector con la punta de flecha del *segundo*, ésta es la resultante de los dos vectores.



(A) Para sumar dos vectores

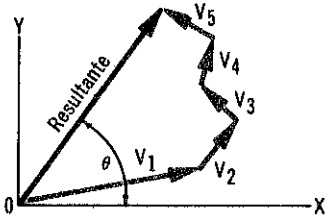


(B) Primero colóquelos de modo que el origen de uno coincida con la punta del otro



(C) La recta que cierra la figura para formar un triángulo constituye la resultante. La longitud de la línea es la magnitud de la resultante y el ángulo θ es su dirección

El método del triángulo también se puede usar, cuando se tienen más de dos vectores. Primeramente, se colocan todos los vectores, uno a continuación del otro. Luego se traza una recta desde el origen del primer vector hasta la punta de flecha del último. Esta recta es la resultante total de todos los vectores.

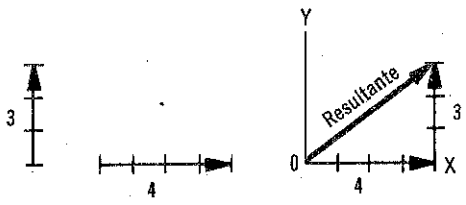


El método del triángulo se puede usar para encontrar la resultante de varios vectores

Igual que el método del paralelogramo, el método del triángulo se usa principalmente para analizar y expresar relaciones entre cantidades vectoriales, pero resulta de poca utilidad en la adición de vectores, cuando se trata de obtener soluciones numéricas.

suma de vectores defasados 90 grados

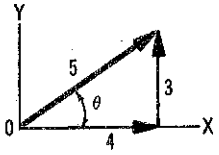
Un caso muy especial de vectores que no tienen la misma dirección ni direcciones opuestas, es aquel en que sus direcciones *difieren* en 90 *grados*. Según se verá más tarde, estos vectores son especialmente importantes en electricidad, porque se relacionan con la diferencia de fase de 90 grados, que existe entre la tensión y la corriente en circuitos capacitivos e inductivos.



Dos vectores cuyas direcciones son divergentes en 90° se pueden sumar gráficamente, usando el método del triángulo vectorial. La resultante y los dos vectores forman un triángulo rectángulo de manera que la magnitud de la resultante se puede calcular empleando el teorema de Pitágoras

Dos vectores defasados 90 grados se pueden sumar ya sea mediante el método del paralelogramo o el del triángulo. Una vez efectuada la adición vectorial, la resultante es la *hipotenusa* de un *triángulo rectángulo*, cuyos otros dos lados o catetos, son los vectores que se suman. Debido a las propiedades del triángulo rectángulo que se resumen en las páginas 4-11 y 4-12, se pueden calcular fácilmente la magnitud y dirección de la resultante. Según se indica, si se conocen las magnitudes de dos vectores y los mismos están defasados 90 grados, la magnitud de la resultante se puede calcular mediante el *teorema de Pitágoras* ($c^2 = a^2 + b^2$). La dirección de la resultante, que es el ángulo (θ) entre ésta y el eje horizontal, se puede encontrar mediante la *relación trigonométrica* entre el seno del ángulo y los catetos del triángulo.

Teorema de Pitágoras
$c^2 = a^2 + b^2$



$$(\text{Resultante})^2 = a^2 + b^2$$

$$\text{Resultante} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \sqrt{9 + 16} = \sqrt{25} = 5$$

La dirección de la resultante se puede encontrar usando la relación trigonométrica:

$$\text{sen } \theta = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}} = \frac{3}{5} = 0.6$$

Por lo tanto, según la tabla de funciones trigonométricas: $\theta = 36.9°$

En este punto, conviene hacer una pausa para repasar triángulos rectángulos y su solución. Para el repaso se puede usar cualquier texto elemental de trigonometría, o libros que tratan de matemáticas aplicadas a la electricidad.

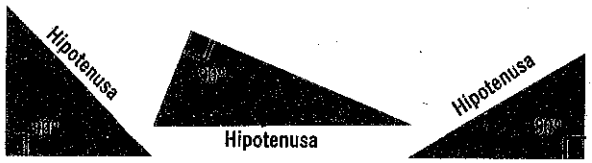
propiedades del triángulo rectángulo

Este es un triángulo rectángulo

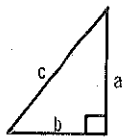
y éste es un triángulo rectángulo;

y también éste es un triángulo rectángulo

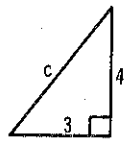
Un triángulo rectángulo es aquel que contiene un ángulo de 90°



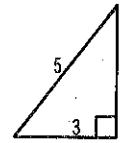
El lado del triángulo opuesto al ángulo de 90° recibe el nombre de hipotenusa



Los tres lados se designan a, b y c, siendo c la hipotenusa



Si se conocen dos lados cualesquiera, el tercero se puede encontrar mediante el teorema de Pitágoras



$c^2 = a^2 + b^2$

$c = \sqrt{a^2 + b^2}$

$= \sqrt{16 + 9}$

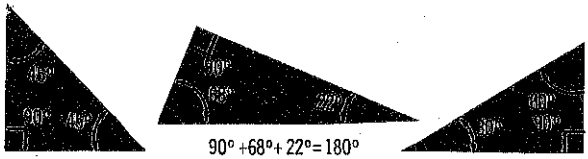
$= \sqrt{25}$

$= 5$

Según el teorema de Pitágoras, la relación entre las longitudes de los tres lados de un triángulo rectángulo es:

$$c^2 = a^2 + b^2$$

donde c es la longitud de la hipotenusa y a y b son las longitudes de los otros dos lados (catetos)



En cualquier triángulo la suma de los ángulos es 180°

$90° + 45° + 45° = 180°$

$90° + 68° + 22° = 180°$

$90° + 30° + 60° = 180°$

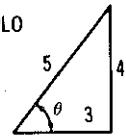
Otras propiedades del triángulo rectángulo se presentan en la siguiente página.

propiedades del triángulo rectángulo (cont.)

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD DE
FERNANDO SILICEO
"ACERVO

Seno de cualquier ángulo = $\frac{\text{longitud del cateto opuesto}}{\text{Longitud de la hipotenusa}}$

EJEMPLO



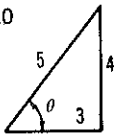
$\text{sen}\,\theta = 4/5$

$= 0.8$

Los dos ángulos de un triángulo rectángulo menores de 90° se relacionan con las longitudes de los catetos según las relaciones trigonométricas de seno, coseno y tangente

Coseno de cualquier ángulo = $\frac{\text{Longitud del cateto adyacente al ángulo}}{\text{Longitud de la hipotenusa}}$

EJEMPLO



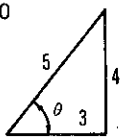
$\cos\,\theta = 3/5$

$= 0.6$

Una vez que se conoce el valor del seno, coseno o tangente de un ángulo, puede encontrarse la magnitud del ángulo en grados, empleando un tabla normal de funciones trigonométricas

Tangente de cualquier ángulo = $\frac{\text{longitud del cateto opuesto}}{\text{Longitud del cateto adyacente al ángulo}}$

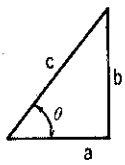
EJEMPLO



$\tan\,\theta = 4/3$

$= 1.33$

Puesto que: $\cos\,\theta = a/c$



$a = c \times \cos\,\theta$

y puesto que $\text{sen}\,\theta = b/c$

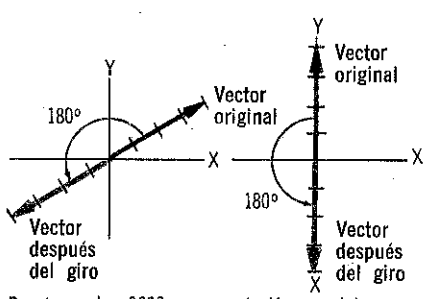
$b = c \times \text{sen}\,\theta$

Si se conocen, la longitud de la hipotenusa y el ángulo entre ésta y uno de los catetos, entonces, la longitud de los otros dos catetos se encuentra a partir de las relaciones trigonométricas de seno y coseno

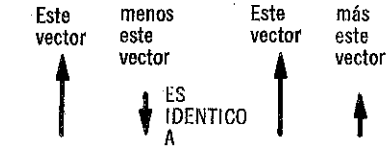
resta de vectores

Para restar un vector de otro, se *suma* el *equivalente negativo* del vector que va a sustraer, al otro vector. Esto significa que el vector que se va a sustraer debe convertirse a su equivalente negativo y, después, simplemente se suman los dos vectores, escogiendo el método de *suma vectorial* que sea el más conveniente.

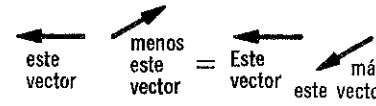
El equivalente negativo de un vector se obtiene *girando el vector* 180 *grados*. La magnitud del vector no varía, pero su dirección se invierte.



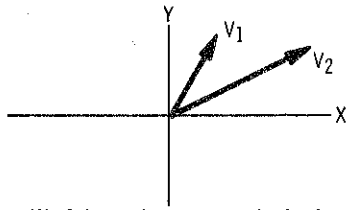
Puesto que hay 360° en una rotación completa, cuando se gira un vector 180°, éste completa la mitad de una vuelta y señala en la dirección opuesta. La rotación no tiene efecto alguno sobre la magnitud del vector



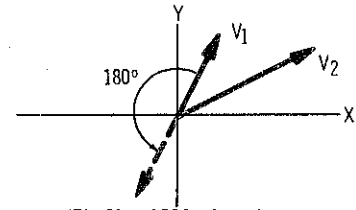
La substracción de vectores es idéntica a la adición de vectores excepto que el vector que debe restarse se gira 180°



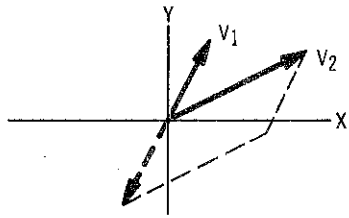
Para restar vectores usando el método del paralelogramo



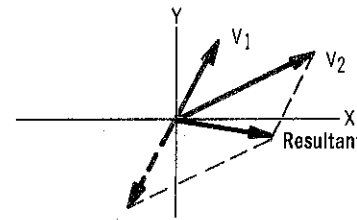
(A) Coloque los vectores haciendo coincidir sus orígenes



(B) Gire 180° el vector que se debe restar



(C) Complete el paralelogramo



(D) Trace la diagonal del paralelogramo

resumen

☐ Los ángulos de fase se emplean para describir las relaciones de tiempo entre tensión y corriente alternas. También especifican la posición o punto con respecto al tiempo para una tensión o corriente. ☐ En un circuito puramente resistivo, la tensión y la coriente están en fase. ☐ En un circuito puramente inductivo, la tensión aplicada está adelantada 90 grados con respecto a la corriente. ☐ En un circuito puramente capacitivo la corriente está adelantada 90 grados con respecto a la tensión aplicada. ☐ Las cantidades que sólo tienen magnitud reciben el nombre de escalares; las que tienen tanto magnitud como dirección, se llaman vectores. ☐ Con frecuencia se usan vectores para expresar relaciones de tensión y corriente.

☐ Los vectores que tienen la misma dirección se pueden sumar simplemente agregando las magnitudes de cada uno de los vectores. ☐ La suma de los vectores que tienen direcciones opuestas es un vector cuya magnitud es la diferencia de los dos vectores y cuya dirección es la misma que la del vector mayor. ☐ Por lo general, el método del paralelogramo se emplea para sumar gráficamente los vectores. ☐ Otro método para sumar gráficamente vectores es el método del triángulo.

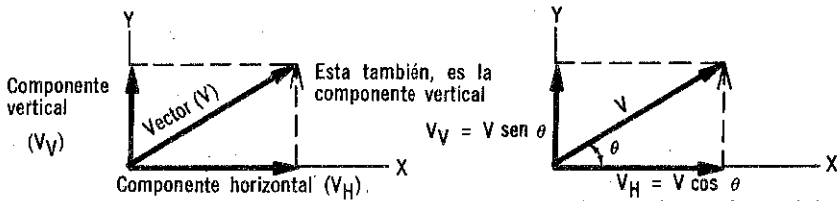
☐ La resultante de dos vectores que están separados 90 grados se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras: $c^2 = a^2 + b^2$. ☐ Las funciones trigonométricas de los ángulos de un triángulo rectángulo son: seno = cateto opuesto/hipotenusa; coseno = cateto adyacente/hipotenusa; tangente = cateto opuesto/cateto adyacente. ☐ Para restar dos vectores, el equivalente negativo del vector que debe sustraerse se suma al otro vector. ☐ El equivalente negativo de un vector se obtiene girando el vector 180 grados.

preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la relación de fase entre la tensión y la coriente en un circuito exclusivamente inductivo?
2. ¿Cuál es la relación de fase entre la tensión y la corriente en un circuito exclusivamente capacitivo?
3. ¿Cuál es la relación de fase entre la tensión y la corriente en un circuito exclusivamente resistivo?
4. ¿Cómo se efectúa la suma de vectores que tengan la misma dirección?
5. ¿Cómo se efectúa la suma de vectores que tengan direcciones opuestas?
6. ¿Se colocan los vectores uno a continuación de otro, o bien con los orígenes coincidentes, en el método del paralelogramo para suma de vectores?
7. ¿Es un método gráfico para sumar vectores el llamado método del triángulo?
8. Enuncie el *teorema de Pitágoras.*
9. ¿Qué significan las expresiones *seno, coseno* y *tangente* de un ángulo?
10. ¿Cómo se restan los vectores?

separación de vectores en sus componentes

Todo vector puede descomponerse o resolverse en otros dos vectores que estén defasados 90 grados uno con respecto al otro y cuya suma dé el vector original. A estos dos vectores se les llama *componentes* del vector original. La dirección de uno es horizontal, así que se le llama *componente horizontal*; el otro tiene dirección vertical y, por tanto, se le llama *componente vertical*. En efecto, la magnitud del vector original se divide entre las dos componentes, las cuales indican qué parte de dicha magnitud tiene dirección horizontal y qué parte está en dirección vertical.



Las proyecciones de un vector sobre los ejes horizontal y vertical son las componentes horizontal y vertical

Por las relaciones trigonométricas existentes entre los catetos y ángulo de un triángulo rectángulo, la proyección vertical, o sea la componente vertical, es $V_V = V \text{ sen } \theta$ Y la proyección horizontal, que es la componente horizontal, es $V_H = \cos \theta$

Como se ha ilustrado, un vector y sus dos componentes forman un triángulo rectángulo. Téngase presente que si en un triángulo rectángulo, se conoce la longitud de la hipotenusa y uno de los ángulos y por supuesto, el ángulo recto, se pueden calcular las longitudes de los otros dos lados mediante las funciones seno y coseno. Por lo tanto, si se conoce la magnitud y dirección de un vector, se pueden usar las funciones seno y coseno, para encontrar sus componentes. La componente horizontal se encuentra mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Componente horizontal} = \text{vector original} \times \cos \theta$$

y la componente vertical:

$$\text{Componente vertical} = \text{vector original} \times \text{sen } \theta$$

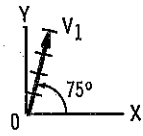
donde θ es el ángulo que forma el vector original y el eje horizontal.

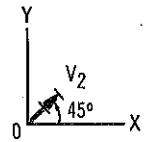
suma de vectores por componentes

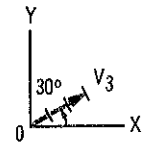
Tal vez el lector se pregunta cuál es el objeto de resolver vectores en componentes. La razón principal es que esto facilita la suma de los vectores. Cuando se suman los vectores, primeramente se les resuelve en componentes. Entonces, las componentes horizontales de cada vector pueden sumarse para encontrar la *componente horizontal total.* En forma similar, pueden sumarse las componentes verticales para encontrar la *componente vertical total.* Estas componentes totales son las componentes del vector resultante y están defasadas 90 grados.

De modo que, ahora, puede determinarse la resultante, si se suman las componentes totales por medio de cualquiera de los métodos usuales para resolver triángulos rectángulos.

El método anterior no se usa para sumar vectores que tienen direcciones iguales u opuestas o que estén separados 90 grados, ya que existen procedimientos relativamente sencillos para sumar tales vectores.







Un buen ejemplo de la adición de vectores por medio de sus componentes, lo proporcionan los tres vectores ilustrados, los cuales se resolverán en componentes y luego se sumarán. La componente horizontal de cada vector se determina mediante la ecuación $V_H = V \cos \theta$. Por lo tanto

$$V_{H1} = 4 \times \cos 75° = 4 \times 0.2588 = 1.14$$
$$V_{H2} = 2 \times \cos 45° = 2 \times 0.7071 = 1.41$$
$$V_{H3} = 3 \times \cos 30° = 3 \times 0.866 = 2.6$$

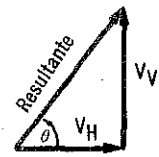
La componente vertical de cada vector se determina en seguida, por medio de la ecuación $V_V = V \text{ sen } \theta$.

$$V_{V1} = 4 \times \text{sen } 75° = 4 \times 0.9659 = 3.86$$
$$V_{V2} = 2 \times \text{sen } 45° = 2 \times 0.7071 = 1.41$$
$$V_{V3} = 3 \times \text{sen } 30° = 3 \times 0.5000 = 1.5$$

suma de vectores por componentes (cont.)

Luego se determinan las componentes totales sumando las componentes particulares. La componente horizontal, V_H es

$$V_H = V_{H1} + V_{H2} + V_{H3}$$
$$= 1.14 + 1.41 + 2.6 = 5.15$$



La componente vertical total, V_V es

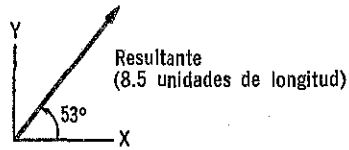
$$V_V = V_{V1} + V_{V2} + V_{V3}$$
$$= 3.86 + 1.41 + 1.5 = 6.77$$

Ahora estas componentes totales se suman vectorialmente para determinar la magnitud del vector resultante. Puesto que las componentes y la resultante forman un triángulo rectángulo, se usa el teorema de Pitágoras

$$c^2 = a^2 + b^2$$
$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(5.15)^2 + (6.77)^2}$$
$$= \sqrt{26.5 + 45.8} = \sqrt{72.3} = 8.5$$

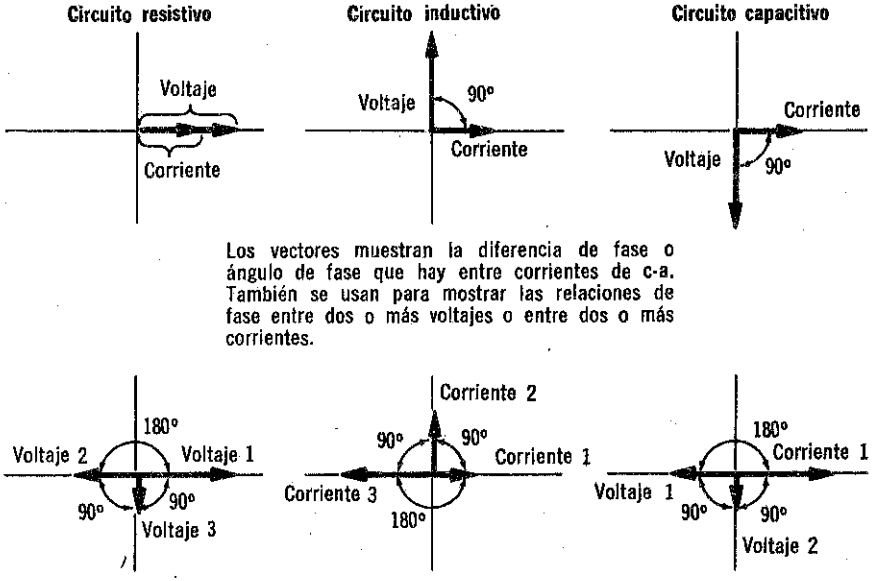
La magnitud de la resultante es, pues, de 8.5 unidades. Sin embargo, antes de trazar el vector, hay que determinar su dirección. Esto se hace a base de la relación que existe entre la tangente del ángulo subtendido por la resultante y el eje horizontal, y las dos componentes.

En cuanto se conoce la tangente del ángulo, el ángulo mismo se puede determinar a partir de una tabla de funciones trigonométricas. En este caso, el ángulo es aproximadamente de 53 grados. Por lo tanto, la suma de los tres vectores originales es un vector que forma un ángulo de 53 grados con el eje horizontal, y cuya magnitud es de 8.5 unidades.



vectores asociados con ángulos de fase de ondas sinusoidales

Según se advirtió al principio de este volumen, los vectores son muy útiles para expresar la diferencia de fase que hay entre tensiones y corrientes alternas, o sea el ángulo de fase. Cuando se usan con este propósito, la tensión, o bien la corriente alterna, constituye la magnitud física representada por el vector. Por ejemplo, igual que con todos los vectores, la longitud de un vector de tensión corresponde a la amplitud de la tensión. Pero cabe notar que la dirección del vector no representa la direc-

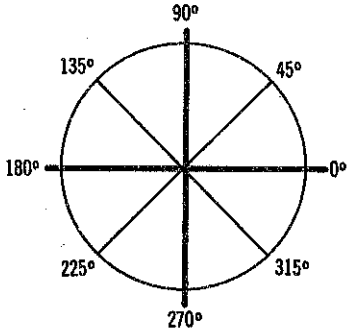


ción de la tensión. De hecho, la dirección del vector por sí misma *carece de significado* y sólo lo adquiere cuando se la compara con la dirección de otro vector ya sea de tensión o de corriente. Así pues, lo que importa es la diferencia que hay en la dirección de los vectores de tensión y de corriente alternas. Esta diferencia se expresa en grados y representa la *diferencia de fase* entre las dos cantidades vectoriales.

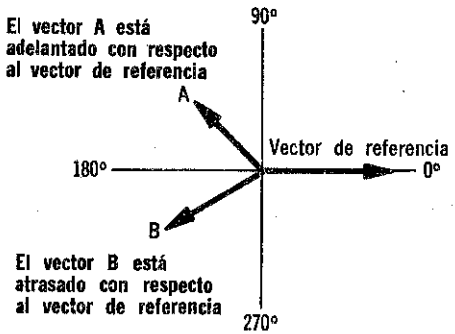
Los vectores representativos de c-a se llaman *vectores rotatorios* o fasores, ya que representan magnitudes características de ondas sinusoidales, es decir cantidades que, según se explicó anteriormente, son determinadas por la rotación de la armadura de un generador de c-a.

representación gráfica de vectores rotatorios

Los vectores representativos de c-a o fasores, muestran tanto las amplitudes como las relaciones de fase entre tensiones y corrientes, las cuales tienen características de ondas sinusoidales. La *longitud* del vector muestra la amplitud, en tanto que el ángulo entre los vectores indica la fase. Además, la posición de los vectores indica cuál de ellos está *adelantado* y cuál está *atrasado*.

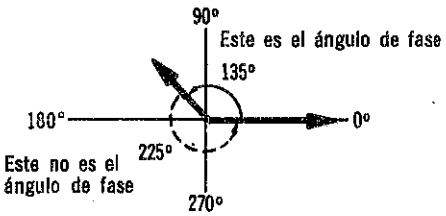


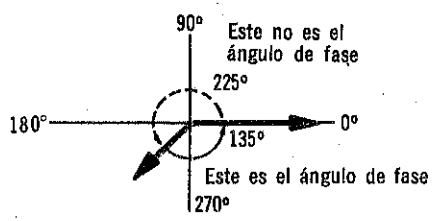
Los vectores de c-a pueden tener una dirección que corresponde a cualquier ángulo de 0 a 360°, medido a partir de la dirección de referencia de 0°



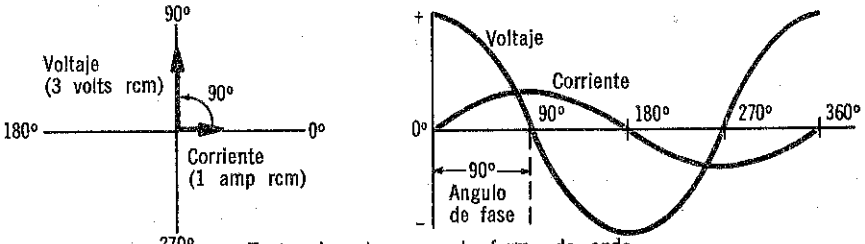
En cualquier gráfica de vectores de c-a, un vector sirve como vector de referencia y señala en la dirección 0°. Los vectores que se encuentran arriba del eje horizontal están adelantados con respecto al vector de referencia y los que se encuentran debajo, están atrasados

Como puede verse en la figura, la gráfica está dividida en 380 grados que corresponden a un ciclo sinusoidal completo. El punto inicial o de referencia, de cero grados, está en el eje horizontal a la derecha y los ángulos de fase de otros vectores se comparan con esta referencia. Los vectores *adelantados* con respecto al vector de referencia se *encuentran arriba* del eje horizontal y los *atrasados* están *abajo*.





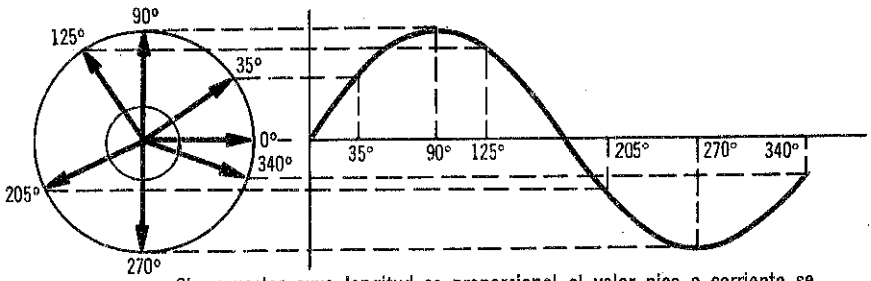
El ángulo entre cualquier vector y el vector de referencia se mide en el sentido en que resulte menor que 180°. Así pues, el ángulo de fase entre el vector de referencia y un vector que está adelantado con respecto a él se miden en el sentido contrario a las manecillas del reloj, comenzando en el vector de referencia. El ángulo entre el vector de referencia y un vector que está atrasado, se mide en el sentido contrario a las manecillas del reloj, comenzando en el vector atrasado



Tanto el vector como la forma de onda muestran que está adelantado 90° con respecto a la corriente. Cabe notar que los vectores muestran los valores efectivos de corriente, en tanto que las formas de onda muestran los valores instantáneos

vectores y ondas sinusoidales

Tanto los vectores como las ondas sinusoidales en c-a indican las amplitudes y relaciones de fase de las tensiones y corrientes alternas. Sin embargo, hay una importante diferencia en el *tipo* de amplitud mostrada. Una onda indica todos los valores *instantáneos* de corriente o tensión, a lo largo de un ciclo sinusoidal completo; en tanto que un vector muestra *un* solo valor, debido a que tiene una longitud fija. Este valor puede ser el de pico, el medio o el efectivo, según sea el caso específico en que se use el vector. Si la longitud del vector es proporcional a la amplitud *pico*, su *componente* vertical es proporcional a la amplitud instantánea para cualquier ángulo de fase. Por lo tanto, si un vector correspondiente a la amplitud pico de una tensión o corriente se gira 360 grados, tal como se muestra en la figura, entonces, la magnitud de su componente vectorial determinará el trazo de la onda que corresponde a este vector.



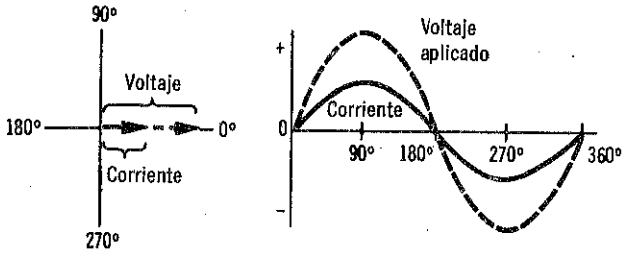
Si un vector cuya longitud es proporcional al valor pico o corriente se gira 360°, la componente vertical del vector determinará el trazo de la onda correspondiente al voltaje, o a la corriente

El hecho de que los vectores muestren un valor fijo de tensión o corriente, no implica que tengan poca aplicación. Pueden representar amplitudes medias, efectivas o de pico y, al resolver problemas prácticos, generalmente se trabaja con estos valores.

vectores de circuitos puramente resistivos, inductivos y capacitivos

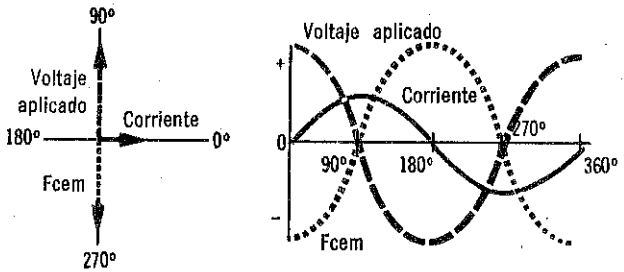
A continuación, se muestran las representaciones vectoriales y las ondas correspondientes, de las corrientes y tensiones en circuitos exclusivamente resistivos, inductivos y capacitivos.

Circuito exclusivamente resistivo



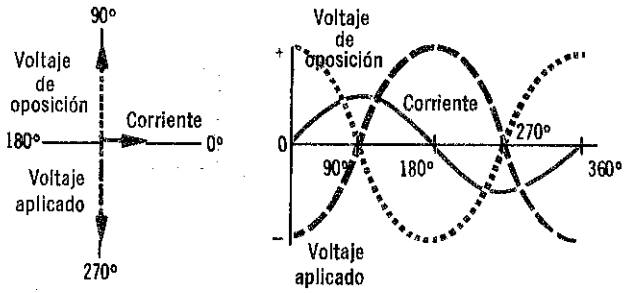
La corriente y voltaje están en fase

Circuito exclusivamente inductivo



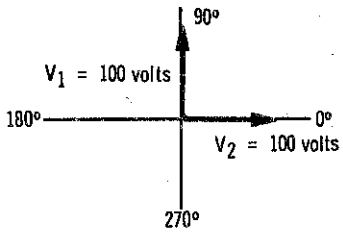
El voltaje aplicado está adelantado 90° con respecto a la corriente. La fcem o fem inducida está defasada 180° con respecto al voltaje aplicado y atrasada 90° con respecto a la corriente

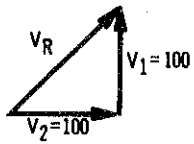
Circuito exclusivamente capacitivo



El voltaje aplicado está atrasado 90° con respecto a la corriente. El voltaje de oposición está defasado 180° con respecto al voltaje aplicado, y adelantado 90° con respecto a la corriente

problemas resueltos





Problema 1. Si dos tensiones con amplitudes iguales están separadas 90 grados, según se muestra, ¿cuál es su suma?

Puesto que las dos tensiones tienen una separación de 90 grados, sus vectores forman un triángulo rectángulo con la resultante. Por lo tanto, se puede usar el teorema de Pitágoras para calcular la magnitud de la resultante.

$$V_R^2 = V_1^2 + V_2^2$$
$$V_R = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} = \sqrt{(100)^2 + (100)^2} = \sqrt{20{,}000} = 141 \text{ volts}$$

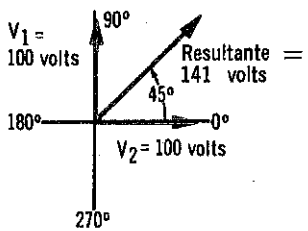
La amplitud de la resultante, por lo tanto, es de 141 volts. Su relación de fase deberá determinarse en seguida. Esto se hace mediante la relación trigonométrica entre la tangente del ángulo θ, y los dos catetos del triángulo vectorial.

$V_R = 141$ $\quad V_1 = 100$ $\quad V_2 = 100$

$$\tan \theta = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{100}{100} = 1$$

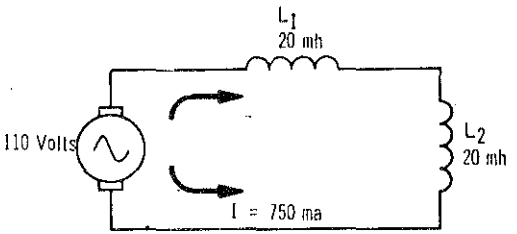
En una tabla de funciones trigonométricas, se puede encontrar que el ángulo cuya tangente es igual a 1, es el de 45 grados.

Por lo tanto, la suma de los dos vectores originales, es un vector resultante que tiene una amplitud de 141 volts, y que está adelantado 45 grados con respecto a la tensión V_2.



problemas resueltos (cont.)

Problema 2. Trace un diagrama vectorial que represente las corrientes y tensiones del siguiente circuito:

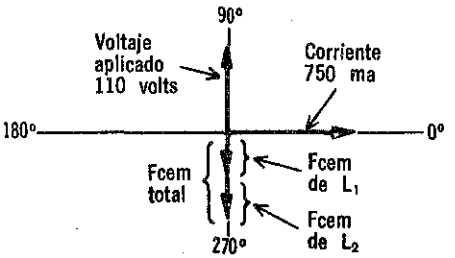


Ya que se trata de un circuito en serie, la corriente en todo el circuito es la misma. Por lo tanto, sólo habrá un vector de corriente, y éste debe tomarse como vector de referencia. La tensión aplicada será un vector de tensión y, puesto que existen dos bobinas y cada una produce una fem inducida o fcem, también, habrá dos vectores para dichas fuerzas, o sea tres vectores de tensión, en total.

La fuerza electromotriz inducida o contraelectromotriz siempre está defasada 180 grados con respecto a la tensión aplicada, de modo que los vectores fcem y el vector de tensión aplicada tendrán direcciones opuestas. Además, la tensión aplicada en un circuito exclusivamente inductivo está adelantada 90 grados con respecto a la corriente. Por lo tanto, si la corriente es el vector de referencia y por lo tanto se considera que tiene una dirección de cero grados, el vector de la tensión aplicada debe tener una dirección de 90 grados. Además, puesto que los vectores de la fcem tienen dirección opuesta al vector de tensión aplicada, deberán tener una dirección de 270 grados.

Las amplitudes de la tensión y la corriente aplicadas están enunciadas en el problema; pero las amplitudes de la fcem no lo están. Sin embargo, como las inductancias de las bobinas son iguales, se sabe que las fcem también deben ser iguales; de manera que sus vectores necesariamente tienen longitudes iguales.

Con base en el razonamiento anterior, se trazaría el diagrama vectorial como sigue:



resumen

☐ Todo vector se puede descomponer o resolver, en dos componentes cuyas direcciones difieren 90 grados. A éstas se les llama componente horizontal y componente vertical, respectivamente. ☐ Las componentes vectoriales que tienen la misma dirección se pueden sumar aritméticamente. ☐ La magnitud del vector resultante se puede determinar a partir de las componentes, mediante el teorema de Pitágoras.

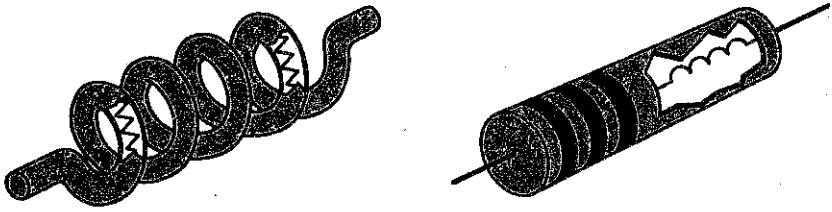
☐ Los vectores representativos de c-a reciben el nombre de vectores rotatorios o fasores representan cantidades que varían sinusoidalmente. ☐ Los vectores representativos de c-a indican tanto la amplitud como las relaciones de fases existentes entre tensiones y corrientes sinusoidales. ☐ La longitud de un fasor indica la amplitud del voltaje o corriente alternas. ☐ El ángulo entre dos fasores indica la diferencia de fase entre las dos cantidades vectoriales. ☐ La gráfica en que se trazan estos vectores pueden dividirse en 360 grados para representar un ciclo completo de onda sinusoidal. ☐ Los ángulos de fase de los vectores se comparan con el punto de referencia o el de cero grados que se encuentra a la derecha en el eje horizontal.

☐ Una onda indica todos los valores instantáneos de corriente y tensión a lo largo de un ciclo completo de una onda sinusoidal. ☐ Un vector indica exclusivamente un valor; éste puede ser el valor pico de la amplitud, o bien su valor medio o su valor efectivo.

preguntas de repaso

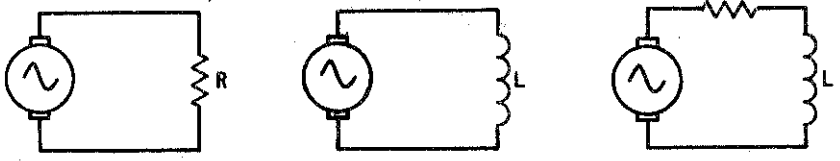
1. Ilustrar y explicar lo que significan las expresiones *componente horizontal* y *componente vertical* de un vector.
2. ¿Qué magnitud tiene la componente vertical de un vector horizontal cuya magnitud es 100? ¿Cuál es la magnitud de la componente horizontal?
3. En la pregunta 2, ¿cuál es el ángulo de fase entre el vector y el eje vertical?
4. La componente horizontal de un vector es 5 y la componente vertical es 12. ¿Cuál es la magnitud del vector? ¿Cuál es la dirección, con respecto al eje horizontal?
5. La magnitud de un vector es 20 y su componente horizontal es 16. ¿Cuál es el valor de la componente vertical?
6. ¿Qué significa un *vector rotatorio* o fasor? ¿Por qué se le llama así?
7. ¿Qué indica un vector rotatorio o fasor?
8. ¿Qué amplitud de tensión o corriente indica una onda?
9. Explique la diferencia que hay entre *un vector* y *una onda.*
10. Sobre un diagrama vectorial, muestre la diferencia de fase entre la tensión aplicada y la corriente. *a*) en un circuito exclusivamente inductivo; *b*) en un circuito exclusivamente capacitivo y *c*) en un circuito exclusivamente resistivo.

circuitos RL

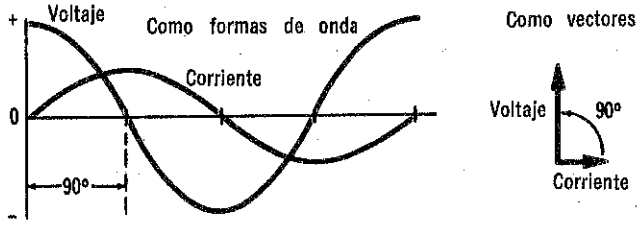


Un circuito RL es el que tiene tanto *resistencia* (R) como *inductancia* (L). En el volumen 3, se establecieron las características de circuitos de c-a que sólo tienen resistencia o sólo tienen inductancia. Muchas de estas características se *modifican* cuando hay tanto resistencia como inductancia. Como resultado, deben usarse diferentes métodos y ecuaciones para resolver problemas de circuitos RL. Obsérvese que la razón básica de las diferencias entre los circuitos RL y circuitos exclusivamente resistivos o inductivos es que las *relaciones* de fase en las partes resistivas de circuitos RL son *diferentes* de las relaciones de fase en las partes *inductivas*. Sin embargo, ambas relaciones afectan el funcionamiento general del circuito y deben considerarse cuando se resuelvan problemas de circuitos RL. La naturaleza de las relaciones de fase que existen en circuitos en serie y en paralelo, así como los métodos para resolver problemas de circuitos tomando en cuenta estas relaciones de fase, se describen en las páginas siguientes.

Debido a su estructura física, toda bobina contiene algo de resistencia y todo resistor contiene algo de inductancia. Por lo tanto, los tres circuitos son en realidad circuitos RL.

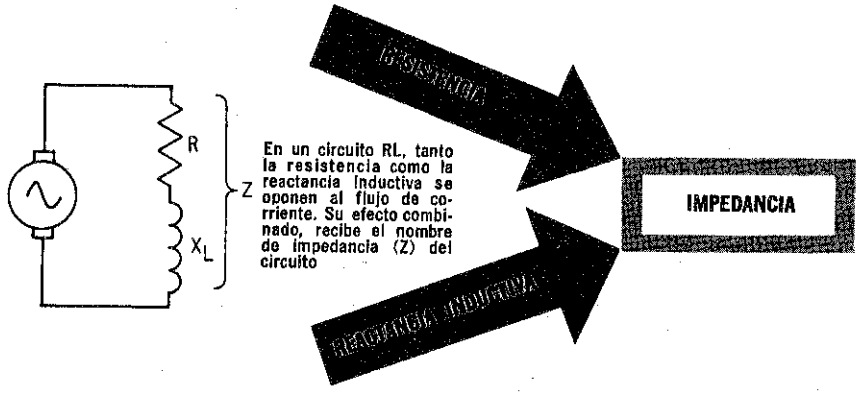


Corriente y voltaje en un inductor



impedancia

En los circuitos resistivos, la resistencia constituye la única oposición al flujo de corriente. En los circuitos inductivos, toda la oposición la presenta la inductancia en la forma de reactancia inductiva. Según se recordará, la resistencia es intrínseca a la carga y es esencialmente independiente de la tensión o la corriente del circuito. Por otra parte, la reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia, de manera que su valor depende de la frecuencia de la tensión aplicada. Además, aunque hay una caída de tensión cuando fluye corriente, ya sea a través de una resistencia o de una reactancia inductiva, la *relación de fase* entre la corriente y la caída de tensión es diferente en una resistencia que en una reactancia. Puesto que la caída de voltaje es una medida de la oposición o la corriente, se puede considerar que la resistencia y la reactancia inductiva son diferentes en fase. En realidad, sólo las cantidades que varían *en el tiempo*, pueden diferir en *fase*; y, puesto que ni la resistencia ni la reactancia inductiva varían, estrictamente hablando, en realidad no pueden diferir en fase. Sin embargo, puesto que sus *efectos* en la corriente tienen una *relación de fase*, la resistencia y la reactancia inductiva misma, se tratan como si tuvieran una relación de fase.

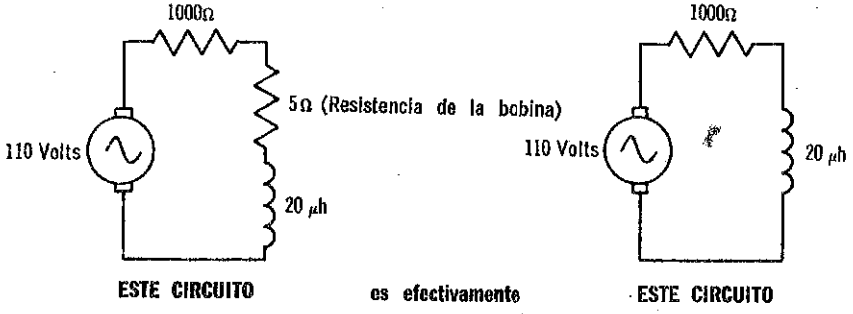


En efecto, aunque tanto la resistencia como la reactancia inductiva se oponen al flujo de corriente, algunas de sus características y efectos son diferentes. Por esta razón, la oposición *total* al flujo de corriente en circuitos RL no se expresan en función de la resistencia ni de la reactancia inductiva. En lugar de ello, se usa una cantidad llamada *impedancia*. La impedancia de un circuito RL se calcula a partir de los valores de resistencia y reactancia inductiva, tomando en cuenta las diferencias entre ellas. La impedancia se mide en ohms y generalmente se designa por la letra Z. Los métodos que se usan para calcular la impedancia dependen de si la resistencia y la reactancia inductiva están en *serie* o en *paralelo*.

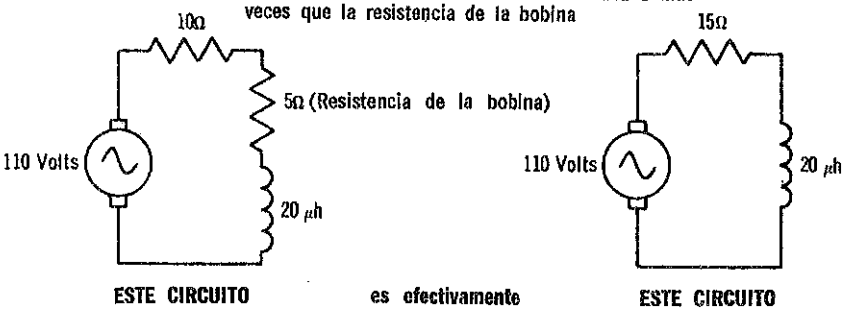
circuitos en serie RL

Cuando se conectan las componentes resistiva e inductiva de un circuito de tal manera que por cada una de ellas fluye la corriente *total* del circuito, el circuito está en *serie* RL. Conviene establecer que la corriente es *igual* en *todos* los puntos del circuito. Según se verá, cualquier análisis de circuito en serie RL se basa en este hecho.

RELACION 10:1



En aplicaciones prácticas, la resistencia de una bobina se puede despreciar si otras resistencias de circuito en serie con la bobina son diez o más veces que la resistencia de la bobina



Al continuar los estudios de electricidad y circuitos eléctricos, se encontrará que esta relación de 10:1 se aplica a muchas situaciones en las que se estudian los efectos relativos de dos cantidades

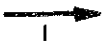
Un circuito en serie RL, puede constar de uno o más resistores, o cargas resistivas, conectadas en serie con una o más bobinas. O, puesto que el alambre usado en cualquier bobina tiene algo de resistencia, un circuito en serie RL puede constar de sólo una o más bobinas, en donde la resistencia de las bobinas, que está *efectivamente* en serie con la inductancia, constituye la resistencia de circuito.

circuitos en serie RL (cont.)

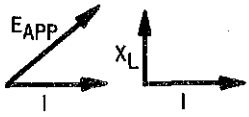
Si un resistor u otra carga resistiva en serie se conecta con una o más bobinas, generalmente su resistencia es mucho mayor que la resistencia de las bobinas. Cuando es *diez*, o más *veces mayor*, puede hacerse caso omiso del efecto de la resistencia de la bobina. En este volumen —a menos que se indique otra cosa—, se supondrá que éste es el caso, y se considerará que las bobinas no ofrecen resistencia.

Se notará que en la exposición referente a circuitos en serie RL, la fase de la *corriente* del circuito, se usa como *referencia de fase* para todas las demás cantidades del circuito. Esto se hace por conveniencia, ya que la corriente es la misma en todo el circuito. Puesto que la corriente se usa como referencia, el vector de corriente en un diagrama vectorial tiene un ángulo de fase de *0 grados*, lo cual significa que es horizontal y señala hacia la derecha. Por lo tanto, cualquier magnitud del circuito que esté en fase con la corriente tendrá también un ángulo de fase de 0 grados. Sin embargo, debe tenerse presente que pueden usarse otras magnitudes del circuito como referencia de fase. La corriente se selecciona en el circuito en serie RL sólo porque es común a todas las partes del circuito.

Uso de la corriente como referencia de fase



En circuitos en serie RL, la corriente se usa como referencia de fase para todas las demás magnitudes. Por lo tanto, tiene un ángulo de fase de 0°



La fase de todas las demás magnitudes del circuito se determina entonces con respecto a la corriente

R y E_R están en fase con I

Las magnitudes en fase con la corriente, también tienen

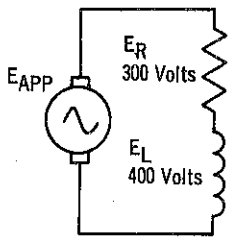
tensión

Cuando se aplica tensión a un circuito en serie RL, la corriente produce una caída de tensión tanto en la resistencia como en la inductancia. Según lo estudiado en el volumen 3, la caída de tensión en una *resistencia* está en *fase* con la corriente que la produce, en tanto que la caída de tensión en una *inductancia*, está *adelantada* 90 grados con respecto a la corriente. Puesto que en un circuito en serie RL la corriente en la resistencia y en la inductancia es la misma, la caída de tensión en la resistencia (E_R) está en fase con la corriente de circuito, en tanto que la caída de tensión en la inductancia (E_L), está adelantada 90 grados con respecto a la corriente. Por lo tanto tomando como referencia la corriente, E_L está *adelantada* 90 grados con respecto a E_R. La amplitud de la caída de tensión en la resistencia es proporcional a la corriente y el valor de la resistencia ($E = RL$). La amplitud de la tensión en la inductancia es proporcional a la corriente y al valor de la reactancia inductiva ($E = IX_L$).

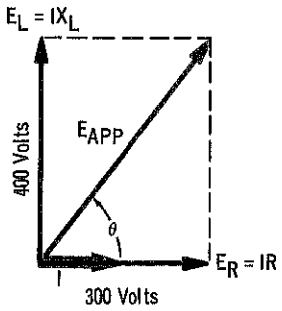
Sin embargo, ésta es una situación nueva para el lector. En todos los circuitos que se han estudiado hasta ahora, la *suma* de todas las caídas de tensión es un circuito en serie, era igual a la tensión aplicada. Esto se ajusta a las leyes de Kirchhoff de tensión. Pero, si se midiese la tensión *aplicada* y luego las *caídas* de tensión en circuito en serie de c-a, se encontraría que la *suma* de las caídas de tensión resulta *mayor* que la tensión aplicada. Esto obedece a que, para aplicar las leyes de Kirchhoff, cuando las caídas de tensión no están en fase, debe usarse la *suma vectorial* de las caídas de tensión en lugar de su suma aritmética. Así pues, la tensión aplicada se puede representar vectorialmente como la suma de dos vectores: uno, el vector E_R, está a 0 grados, ya que se encuentra en fase con la corriente del circuito; el otro vector, E_L, está adelantado 90 grados tanto con respecto a E_R como a I.

La relación entre el voltaje aplicado y las caídas de voltaje en un circuito en serie RL es tal que el voltaje aplicado es igual a la SUMA VECTORIAL de las caídas de voltaje

Circuito



Representación vectorial



Cálculo

$$E_{APP} = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

$$= \sqrt{(300)^2 + (400)^2}$$

$$= 500 \text{ Volts}$$

$$\tan \theta = E_L/E_R$$

$$= 400/300 = 1.33$$

$$\theta = 53.1°$$

tensión (cont.)

Puesto que los dos vectores de tensión están defasados 90 grados, para encontrar la tensión aplicada se pueden sumar vectorialmente empleando el *teorema de Pitágoras:*

$$E_{APP} = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

Gráficamente, la tensión aplicada es la hipotenusa de un triángulo rectángulo; siendo los catetos las caídas de tensión del circuito. El ángulo entre la tensión aplicada y E_R es igual al ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente (I). Esto se debe a que E_R e I están en fase. El valor de θ se puede determinar por medio de:

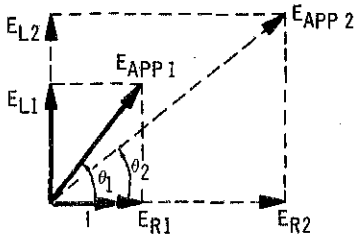
$$\tan \theta = E_L/E_R$$

ó

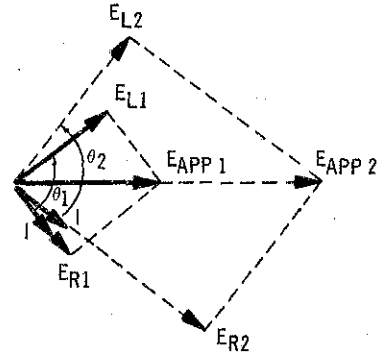
$$\cos \theta = E_R/E_{APP}$$

Si se usa I como vector de referencia, como se muestra a la izquierda en la figura que aparece a continuación, puede parecer que la tensión aplicada cambia de fase al cambiar las caídas de tensión en valores diferentes de resistencia y reactancia inductiva. En realidad, esto sólo parece así debido a que se toma a la corriente como referencia de cero grados.

I como vector de referencia



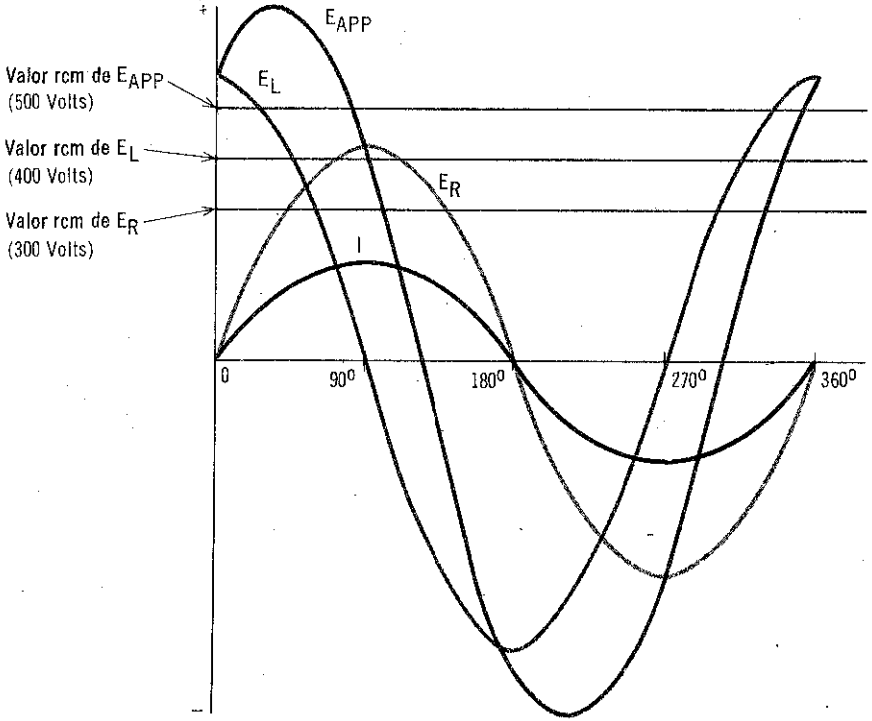
E_{APP} como vector de referencia



Si se hubiese usado la tensión aplicada como referencia, se vería que, en realidad, lo que cambia de fase es la corriente, como se muestra en la ilustración de la derecha. Por lo tanto, para evitar confusión, siempre se considerará el ángulo de fase θ como ángulo *entre* la tensión aplicada y la corriente, más bien que como ángulo de fase de cualquiera de ellas.

formas de onda de tensión

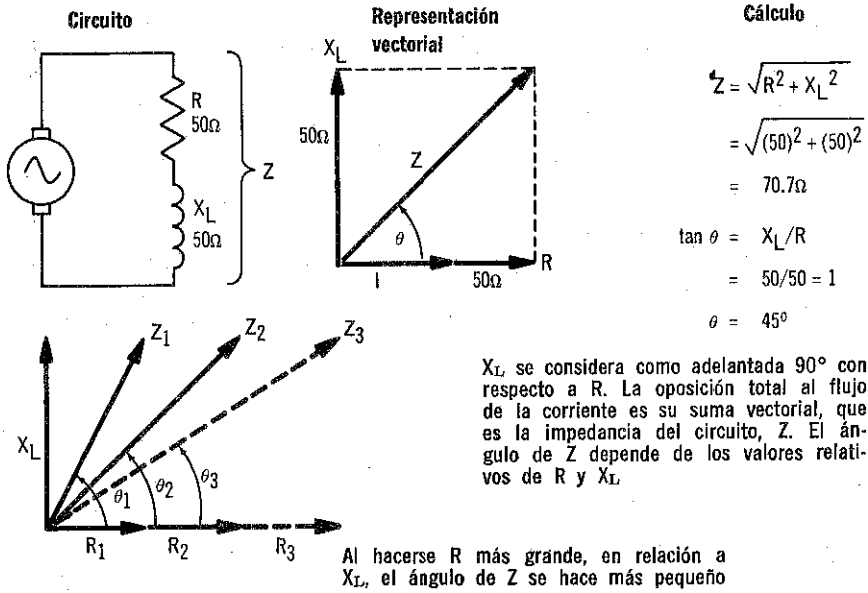
En los cálculos de las páginas anteriores se ha visto que, aunque las diversas caídas de tensión en el circuito eran de 300 y 400 volts, la tensión aplicada, o caída total de tensión, era de 500 volts en lugar de 700 volts. La razón era que las distintas caídas de tensión estaban defasadas. Si hubieran estado en fase, hubiesen alcanzado sus amplitudes máximas al mismo tiempo y se podrían haber sumado directamente. Pero, en vista de que estaban defasadas, tenían que sumarse todos sus *valores instantáneos* y luego encontrar el valor *promedio* o el efectivo de la tensión. Esto se logra por medio de adición de vectores. Dependiendo de qué valores se usen, el resultado que se obtenga será el valor medio o el valor efectivo de la tensión aplicada. Si las caídas de tensión están dadas en valores efectivos, la tensión aplicada que se encuentre también será un valor efectivo. En forma similar, si se trabaja con valores medios, la tensión aplicada que se encuentre será un valor medio.



Todo punto sobre la forma de onda del voltaje aplicado (E_{APP}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las ondas E_R y E_L. El valor rcm de la onda de voltaje aplicado es igual a la suma vectorial de los valores rcm de las ondas E_R y E_L

impedancia y corriente

En un circuito en serie RL, la impedancia es la SUMA VECTORIAL de la resistencia y la reactancia inductiva



X_L se considera como adelantada 90° con respecto a R. La oposición total al flujo de la corriente es su suma vectorial, que es la impedancia del circuito, Z. El ángulo de Z depende de los valores relativos de R y X_L

Al hacerse R más grande, en relación a X_L, el ángulo de Z se hace más pequeño

Según se ha explicado anteriormente, en circuitos RL, conviene considerar que la resistencia y la reactancia inductiva difieren en fase y usar el término (Z) para representar la oposición *total* al flujo de corriente. Ya que en un circuito serie RL fluye la misma corriente tanto a través del resistor como del inductor y la caída de tensión en el resistor está en fase con la corriente, en tanto que la caída de tensión en el inductor está adelantada 90 grados con respecto a la corriente entonces se considera que la reactancia inductiva está adelantada 90 grados con respecto a la resistencia. Por lo tanto la *suma vectorial* de la reactancia y la resistencia, o sea la impedancia, se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Puesto que R y X_L están separados 90 grados, su suma vectorial, Z, formará un ángulo intermedio *entre* cero y 90 grados, con respecto a la corriente del circuito. El ángulo exacto dependerá de los valores *comparativos* de R y X_L. Si R es mayor, Z se aproximará más a 0 grados; y si X_L es mayor, Z se aproximará a los 90 grados. El ángulo se puede determinar a partir de:

$$\tan\theta = X_L/R \qquad \text{ó} \qquad \cos\theta = R/Z$$

El ángulo de fase de Z es igual al ángulo de fase de la tensión aplicada, descrito con anterioridad.

impedancia y corriente (cont.)

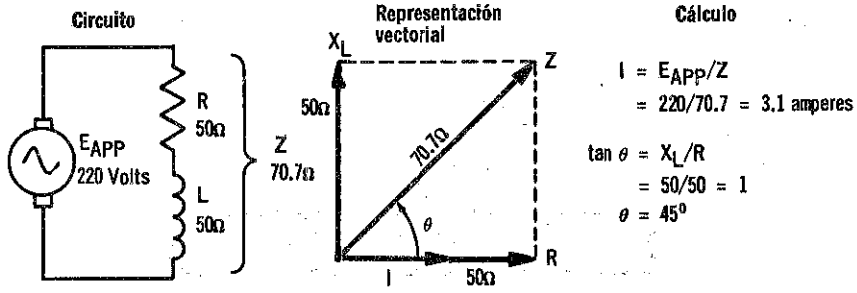
La regla de 10 a 1 que se aprendió anteriormente, se aplica también a la impedancia. Si X_L es 10 veces mayor que R, o viceversa, se puede considerar que el ángulo de fase de Z es de 0 o de 90 grados, dependiendo de cuál sea la mayor. Esencialmente, lo que significa la regla 10 a 1 es que si R es de 10 o más veces mayor que X_L, el circuito funcionará casi en la misma forma que si X_L fuese nula, lo opuesto es correcto si X_L es de 10 o más veces mayor que R.

Las relaciones entre I, E y Z en circuitos RL son similares a las relaciones entre I, E y R en circuitos de c-c. Debido a esto, se pueden usar las ecuaciones de la ley de Ohm para resolver circuitos RL, usando la impedancia (Z) en lugar de la resistencia. A menudo, estas ecuaciones reciben el nombre de *ley de Ohm para circuitos de c-a.* Son las siguientes:

$$I = E/Z \qquad E = IZ \qquad Z = E/I$$

Más adelante, se verá que estas ecuaciones también se aplican a circuitos que tienen capacitancia, además de inductancia y resistencia.

En un circuito en serie RL, la corriente es la misma en todos los puntos y está atrasada con respecto al voltaje aplicada por un ángulo que se encuentra entre 0 y 90°

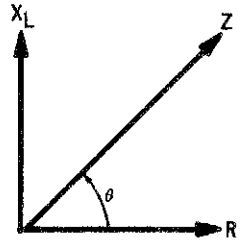


El ángulo calculado es el ángulo de fase de la corriente. Es el mismo que el ángulo de fase de la impedancia encontrada para el mismo circuito en la página anterior. La razón para esto es que los valores X_L y R determinan el ángulo de la impedancia que a su vez determina qué tan inductiva o resistiva es la corriente

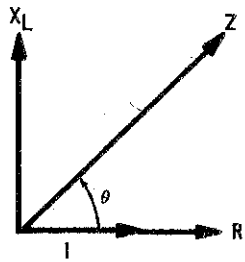
Como en cualquier circuito en serie, la corriente de circuito en serie RL es la *misma* en *cualquier punto.* Como resultado de ello, la corriente en la resistencia está *en fase* con la corriente que fluye a través de la inductancia, ya que, de hecho, es la misma corriente. Si se conocen la tensión aplicada y la impedancia en un circuito en serie RL, se puede calcular la corriente de acuerdo con la ley de Ohm: $I = E_{AP}/Z$, donde E_{AP} es igual a la tensión aplicada y Z es igual a la suma vectorial de la resistencia y la reactancia inductiva ($\sqrt{R^2 + X_L^2}$).

impedancia y corriente (cont.)

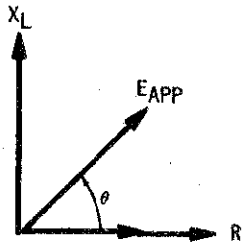
La corriente en un circuito en serie es común a todas las partes del circuito, por lo tanto, se usa como referencia de 0 grados y el ángulo que forma con la impedancia determina si la corriente es más inductiva o resistiva. Según se ha estudiado anteriormente, el ángulo de Z se encuentra en un punto intermedio entre 0 y 90 grados, dependiendo de los valores relativos de la reactancia inductiva y la resistencia.



El ángulo entre Z y R



es igual al ángulo entre Z e I



que es igual al ángulo entre E_{APP} e I

(θ SIEMPRE ESTA DETERMINADA POR X_L Y R)

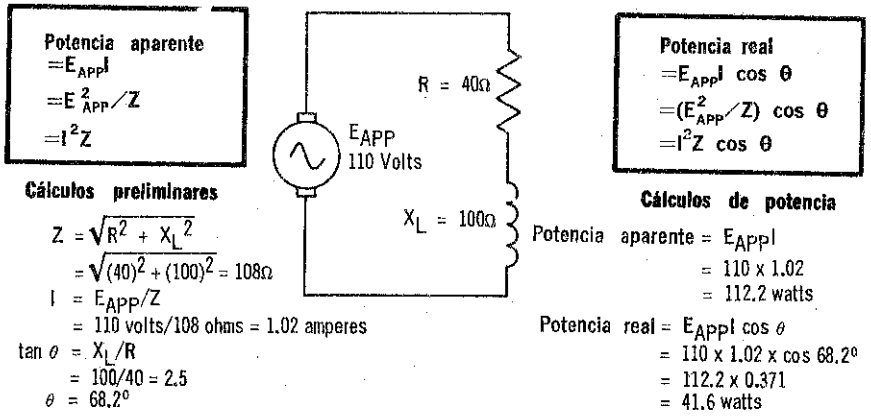
Mientras la reactancia inductiva sea mayor en comparación con la resistencia *mayor* será el ángulo de fase e I tenderá más a comportarse como una corriente inductiva. En forma similar, cuanto *menor* sea la reactancia inductiva comparada con la resistencia, *más* pequeño será el ángulo e I tenderá más a comportarse como una corriente resistiva. Cuando Z e I están exactamente en fase ($Z = R$), la corriente es exclusivamente resistiva; y cuando Z está adelantada 90 grados con respecto a I ($Z = X_L$), la corriente es puramente inductiva. Los términos resistiva e inductiva, aplicados a la corriente, se refieren a la relación de fase entre la corriente y la tensión *aplicada*. Cuanto más se aproxime la corriente a estar en fase con la tensión aplicada, más resistiva será; y cuanto más se aproxime a estar 90 grados atrasada con respecto a la tensión aplicada, más inductiva será.

potencia

En circuitos resistivos, *toda* la potencia que transmite la fuente es *disipada* por la carga; pero, de acuerdo con lo estudiado en el volumen 3, en un circuito RL sólo una parte de la potencia de entrada se disipa. La parte transmitida a la inductancia regresa a la fuente cada vez que desaparece el campo magnético que está alrededor de la inductancia. Por lo tanto, existen dos clases de potencia en un circuito RL. Una es la *potencia aparente*. La otra es la *potencia real* que efectivamente se consume en el circuito. La potencia real depende de qué tanto haya sido regresada a la fuente por la inductancia; a su vez, esto depende del ángulo de fase entre la corriente del circuito y la tensión aplicada. La potencia real se calcula multiplicando la potencia aparente por el coseno del ángulo de fase entre la tensión y la corriente:

$$P_{REAL} = E_{AP}I \cos \theta = I^2Z \cos \theta$$

Puesto que, según el diagrama vectorial de la impedancia, $R = Z \cos \theta$, la ecuación también se puede escribir así, $P_{REAL} = I^2R$. Esto muestra que la potencia real es la que usa la resistencia del circuito.



El valor del coseno de θ puede variar entre 0 y 1 y, según se recordará de lo visto en el volumen 3, recibe el nombre de *factor de potencia* del circuito. Factores de potencia pequeños (próximos a 0) son inconvenientes, ya que significan que la fuente de energía tiene que transmitir más potencia de la que se usa. El factor de potencia se determina según la siguiente relación:

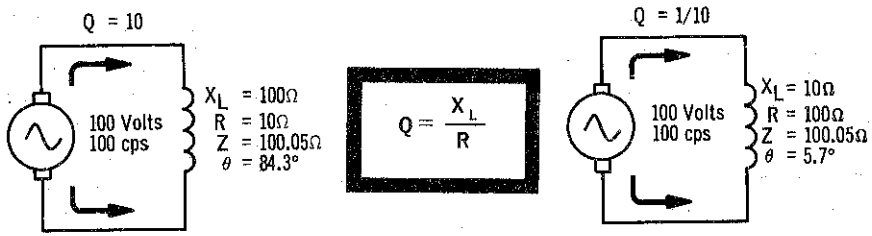
$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{potencia real}}{\text{potencia aparente}}$$

Q de una bobina

Como ya se sabe, toda bobina tiene algo de resistencia, de manera que se comporta como un circuito en serie RL cuando se conecta a una fuente de tensión. Físicamente, es imposible medir *por separado* la caída de tensión en la resistencia de la bobina y la caída en la inductancia de la bobina. Sin embargo, matemáticamente puede suponerse que tanto la resistencia como la inductancia son magnitudes independientes en serie entre sí y que las dos caídas de tensión y su ángulo de fase se pueden calcular. Es obvio que cuanto menor sea la resistencia de la bobina, la bobina se comportará más como un *inductor perfecto*; es decir, con inductancia pero con resistencia nula. Se encontrará que a veces es conveniente comparar bobinas en relación con cuanto se aproximan a la bobina teóricamente perfecta. Esto se hace calculando la *relación* de la reactancia inductiva a la resistencia. Esta relación recibe el nombre de factor de mérito o Q de la bobina. Como ecuación:

$$Q = X_L/R$$

Se puede apreciar que cuanto más alta sea la reactancia inductiva o más baja sea la resistencia, mayor será la Q.



Una bobina con Q alta produce un ángulo de fase mayor, y a la vez es un mejor conductor

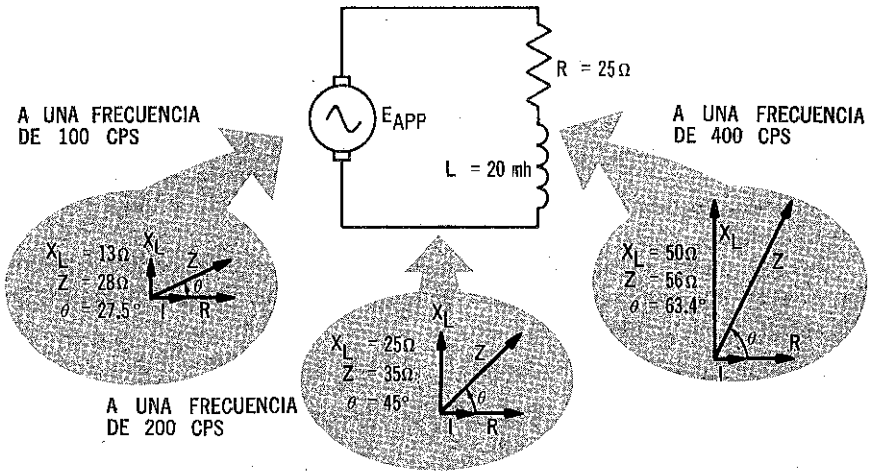
Una bobina con Q elevada tiene un *ángulo de fase grande* (aproximado a 90 grados) entre la tensión en sus terminales y la corriente que circula por ella. Esta bobina originará un intenso campo magnético y por lo tanto una fcem grande, para una tensión aplicada dada. Una bobina con Q baja tiene un *ángulo de fase pequeño* entre su tensión y su corriente y, debido a las pérdidas I^2R causadas por su resistencia relativamente grande, originará un campo magnético más débil y una fcem más baja para una tensión aplicada dada. La Q de una bobina se convierte en un factor importante que debe considerarse al trabajar con circuitos LC, los cuales se estudian más adelante.

Puesto que la resistencia suele ser constante, descontando los efectos de corriente circulantes y la reactancia inductiva cambia con la frecuencia, Q varía generalmente con la frecuencia. Por lo tanto, cuando se comparan bobinas en relación con sus Q, los valores de Q deben entenderse para la misma frecuencia.

efecto de la frecuencia

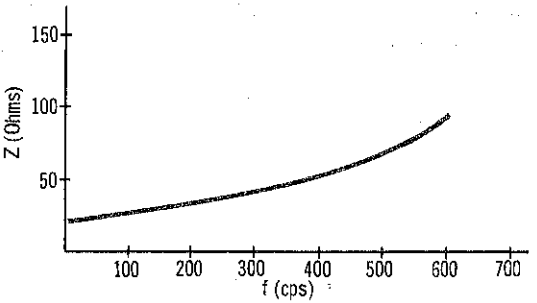
Como se sabe, los *valores relativos* de X_L y R determinan el ángulo de fase de la impedancia y la corriente, así como el factor de potencia del circuito. Cuando X_L es mucho mayor que R, el circuito es muy inductivo y el factor de potencia es próximo a cero. Y de las dos cantidades R o X_L, una de ellas es diez o más veces mayor que la otra, el circuito puede ser considerado exclusivamente resistivo o inductivo, según el caso

Las características de un circuito en serie RL varían según las diferentes frecuencias



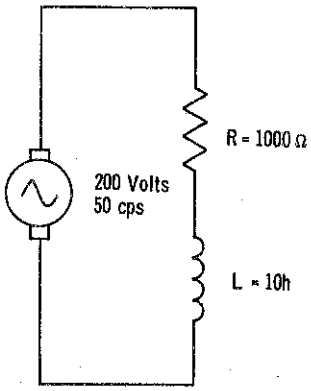
y el factor de potencia considerado respectivamente como uno o cero. Sin embargo, puesto que el valor de X_L aumenta según la frecuencia, también varía el valor relativo de X_L y R. Como resultado, el mismo circuito tendrá propiedades diferentes si se varía la frecuencia. Una frecuencia muy baja puede hacer al circuito casi exclusivamente resistivo; en tanto que una frecuencia muy alta puede hacer que se comporte como si fuese exclusivamente inductivo. Naturalmente, Z también cambia con el valor de X_L en relación con R.

Muy a menudo se traza una gráfica para mostrar los cambios de la impedancia del circuito con respecto a la frecuencia. Esta gráfica recibe el nombre de curva de respuesta a la frecuencia del circuito. La curva de respuesta a la frecuencia del circuito anterior, se muestra en la figura



problemas resueltos

Problema 3. ¿Cuál es la corriente en este circuito?



El primer paso en cualquier problema es analizar la información para determinar si la cantidad que se pregunta puede calcularse directamente o si se requieren otros cálculos.

La cantidad que se desea determinar es la corriente. La ecuación básica para corriente es $I = E/Z$. La tensión está expresada de manera que se sabe que hay que calcular Z. La ecuación para calcular la impedancia es $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, y, a partir del circuito, se puede ver que sólo está expresada R. Por lo tanto, también hay que resolver la reactancia X_L. La ecuación que da la reactancia inductiva es $X_L = 2\pi fL$, y tanto f como L están dadas.

Por lo tanto, el análisis preliminar indica que se necesita calcular tres magnitudes por separado para determinar la corriente: primeramente X_L, luego Z, y finalmente I.

Cálculo de X_L:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 50 \times 10 = 3{,}140 \text{ ohms}$$

Cálculo de Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(1{,}000)^2 + (3{,}140)^2} = 3{,}295 \text{ ohms}$$

Cálculo de I:

$$I = E/Z = 200 \text{ volts}/3{,}295 \text{ ohms} = 0.061 \text{ amperes}$$

Problema 4. En el circuito anterior, ¿cuál es el ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente?

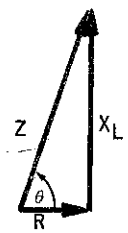
El ángulo de fase puede calcularse a partir de cualquiera de las siguientes ecuaciones: $\tan\theta = E_L/E_R$ ó $\tan\theta = X_L/R$. Puesto que las tensiones aplicadas a la resistencia y a la inductancia no se conocen, pero sí se conocen la reactancia y la inductancia mismas, $\tan\theta = X_L/R$:

$$\tan\theta = \frac{X_L}{R}$$

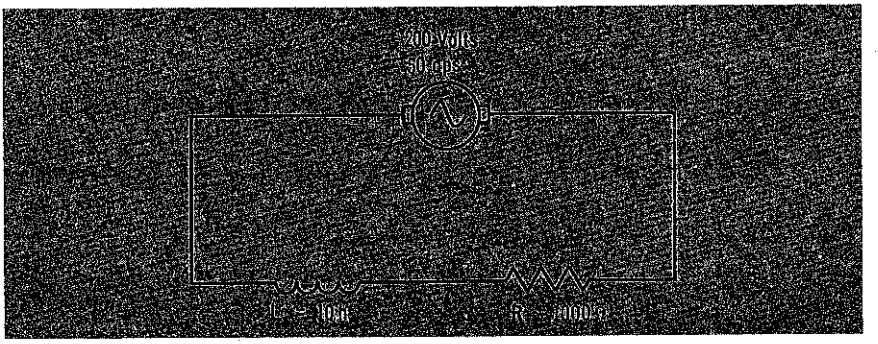
$$= \frac{3{,}140}{1{,}000}$$

$$= 3.14$$

$$\theta = 72.3°$$



problemas resueltos (cont.)



Problema 5. En el circuito, ¿cuál es el ángulo de fase de la impedancia?

El ángulo de fase de la impedancia siempre es idéntico al ángulo de fase de la tensión aplicada y la corriente. Este ángulo de fase se calculó en el problema 4. Por lo tanto, el ángulo de la impedancia también es de 72.3°.

Problema 6. En el circuito, ¿cuáles son las caídas de tensión en R y L?

Ambas caídas de tensión se pueden determinar mediante la ley de Ohm: la caída en la resistencia es $E_R = IR$, y la caída en la inductancia es $E_L = IX_L$. Los valores de I, R y X_L son conocidos, de manera que el problema se puede resolver directamente, no es necesario que se hagan cálculos preliminares.

Cálculo E_R:

$$E_R = IR$$
$$= 0.061 \text{ ampere} \times 1{,}000 \text{ ohms} = 61 \text{ volts}$$

Cálculo E_L:

$$E_L = IX_L$$
$$= 0.061 \text{ ampere} \times 3{,}140 \text{ ohms} = 192 \text{ volts}$$

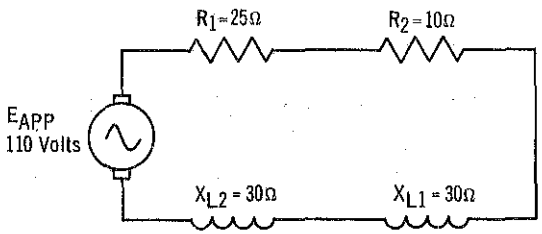
Problema 7. En el circuito, ¿cuáles serían las caídas de tensión en R y L si se eleva la frecuencia de la fuente a 1,000 cps?

El primer paso es determinar el valor que alcanzaría X_L a 1,000 cps:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 1{,}000 \times 10 = 62{,}800 \text{ ohms}$$

Normalmente, el siguiente paso sería calcular la impedancia y luego usar E/Z para determinar la corriente del circuito. Luego se usaría la ley de Ohm para determinar las caídas de tensión. Pero se podría aplicar un método más sencillo mediante la regla 10 a 1 para X_L y R, con lo que se puede apreciar inmediatamente que toda la tensión de la fuente tendría su caída en L.

problemas resueltos (cont.)



Problema 8. ¿Cuál es la impedancia del circuito?

Este circuito se resuelve de la misma manera que uno que contenga sólo una resistencia y una inductancia, excepto que debe calcularse primero la resistencia total y la reactancia inductiva total. Puesto que la resistencia y la inductancia están en serie, esto se hace por adición simple:

$$\begin{aligned} R_{TOT} &= R_1 + R_2 \\ &= 25 + 10 = 35 \text{ ohms} \\ X_{L\,TOT} &= X_{L1} + X_{L2} \\ &= 30 + 30 = 60 \text{ ohms} \end{aligned}$$

La impedancia puede determinarse entonces mediante la siguiente ecuación normal:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R_{TOT}^2 + R_{L\,TOT}^2} \\ &= \sqrt{(35)^2 + (60)^2} = \sqrt{4{,}825} \\ &= 69.5 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Problema 9. ¿Qué potencia se consume en el circuito anterior?

La potencia consumida, o disipada, es potencia real, de manera que debe determinarse la potencia real. La tensión aplicada está dada y la impedancia ya se ha determinado. Por lo tanto, la ecuación más adecuada en este caso es $P_{REAL} = (E^2_{AP}/Z) \cos \theta$. Sin embargo, antes de poder aplicar esta ecuación debe encontrarse el ángulo de fase θ.

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{X_{L\,TOT}}{R_{TOT}} = 60/35 = 1.71 \\ \theta &= 59.7° \end{aligned}$$

Ahora puede calcularse la potencia real:

$$\begin{aligned} P_{REAL} &= \frac{E_{AP}^2}{Z} \cos \theta \\ &= \frac{(110)^2}{69.5} \cos 59.7° \\ &= 174.1 \times 0.505 = 87.9 \text{ watts} \end{aligned}$$

resumen

☐ La oposición total al flujo de la corriente en un circuito RL recibe el nombre de impedancia. La impedancia se mide en ohms y se designa por Z. ☐ En un circuito serie RL, la corriente es igual en todas las componentes. Debido a ello, se usa la corriente como referencia de fase para todas las demás magnitudes del circuito. ☐ La ecuación de tensión de Kirchhoff es válida para un circuito en serie RL, pero las tensiones en la resistencia y la inductancia deben sumarse vectorialmente.

☐ La tensión aplicada a un circuito serie RL se calcula según la expresión $E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$. ☐ El valor del ángulo de fase (θ) se determina: $\tan \theta = E_L/E_R$; ó $\cos \theta = E_R/E_{AP}$. ☐ La magnitud de la impedancia es la suma vectorial de la reactancia y la resistencia: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$. ☐ El ángulo de fase entre R y X_L se obtiene así: $\tan \theta = X_L/R$ ó $\cos \theta = R/Z$. ☐ Puede considerarse que X_L es despreciable cuando R es 10 veces mayor y viceversa.

☐ La ley de Ohm para circuitos de c-a se puede expresar: $E = IZ$. Otras formas de la ecuación son $I = E/Z$ y $Z = E/I$. ☐ La potencia efectiva que se disipa en un circuito recibe el nombre de potencia real. Es igual a la potencia aparente multiplicada por el factor de potencia: $P_{real} = E_{AP} I \cos \theta = I^2 Z \cos \theta$. ☐ La Q de una bobina es la relación de la reactancia a una frecuencia particular, con respecto a la resistencia de la bobina.

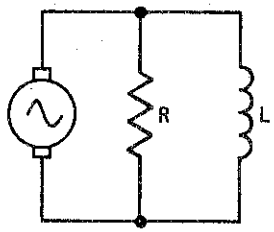
preguntas de repaso

1. En un diagrama vectorial de tensiones en un circuito en serie RL, ¿qué magnitud del circuito se usa como vector de referencia? ¿Por qué?
2. ¿Cuál es la regla de 10 a 1 para R y X_L en un circuito en serie RL?
3. ¿Cuál es la resistencia de una bobina cuya Q vale 65, cuando la reactancia inductiva es de 325 ohms?
4. ¿Cuál es la resistencia de un circuito en serie RL cuando la impedancia es de 130 ohms y la reactancia inductiva de 50 ohms?
5. ¿Cuál es el ángulo de fase en el circuito de la pregunta 4?
6. Si una tensión aplicada de 100 volts produce una corriente de 5 amperes en un circuito en serie RL, ¿cuál es la impedancia del circuito?
7. La potencia disipada en un circuito es de 500 watts, la impedancia 10 ohms, y el ángulo de fase, 60°. ¿Cuál es el valor de la corriente en el circuito?
8. ¿Cuál es la potencia aparente de un circuito que disipa 500 watts con un factor de potencia de 0.25?
9. ¿Entre qué valores se puede encontrar el factor de potencia? ¿Por qué?
10. ¿Cuál es la tensión en las terminales de una bobina en un circuito en serie RL cuando se aplica una tensión de 100 volts y la tensión en la resistencia es de 80 volts?

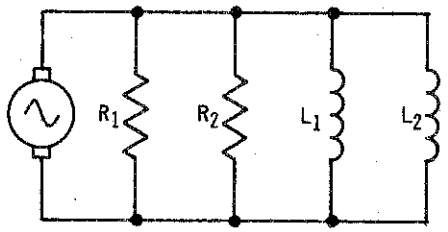
circuitos en paralelo RL

En un circuito en paralelo RL, la resistencia y la inductancia están conectadas en paralelo a una fuente de tensión. Por lo tanto, este circuito tiene una *rama resistiva* y una *rama inductiva.* La corriente del circuito *se divide* antes de entrar a las ramas y una parte de ella fluye a través de la rama resistiva, en tanto que el resto pasa por la rama inductiva. Por lo tanto las corrientes de rama son *diferentes.* El análisis de

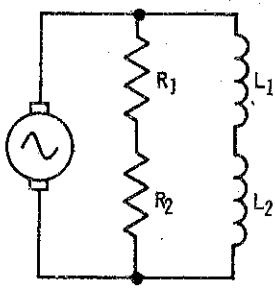
Este es un circuito en paralelo RL



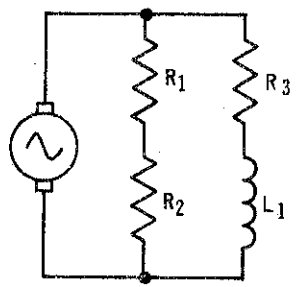
Y este es un circuito en paralelo RL



Este es también un circuito en paralelo RL



Pero este no es un circuito en paralelo RL simple



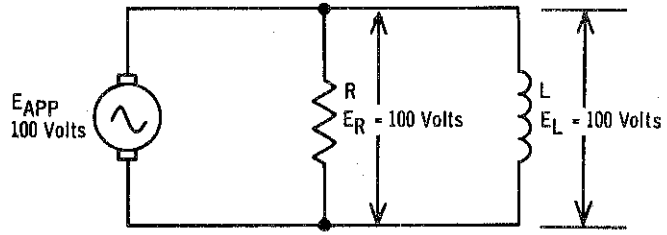
Un circuito en paralelo RL tiene una o más ramas de resistencia y una o más ramas inductivas. Cada rama resistiva es puramente resistiva y cada rama inductiva es puramente inductiva. Si una rama contiene tanto resistencia como inductancia, el circuito es un circuito RL en serie y paralelo. Estos serán estudiados más tarde

circuitos en paralelo RL y los métodos que se usan para resolverlos son diferentes al análisis y solución de circuitos en serie RL. Por lo tanto, conviene que se pueda distinguir entre circuitos en serie RL y en paralelo, de manera que se puedan aplicar las técnicas y métodos adecuados para resolverlos.

tensión

En un circuito en paralelo RL simple, hay una *rama resistiva* y una *rama inductiva*. Ambas están conectadas directamente a la fuente de tensión, por lo que reciben la tensión plena de la fuente. Puesto que la tensión de la fuente en ambas ramas es *la misma*, las tensiones deben estar *en fase*. Por lo tanto, puede concluirse que si se conoce la tensión aplicada, automáticamente se conoce la tensión en cada rama. Igualmente, si se conoce la tensión en una de las ramas, se conoce también la de la otra rama, así como la tensión aplicada.

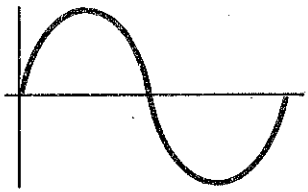
El voltaje en cada rama de un circuito en paralelo RL es el mismo voltaje aplicado



Como vector

E_{APP}, E_R, y E_L

Como forma de onda



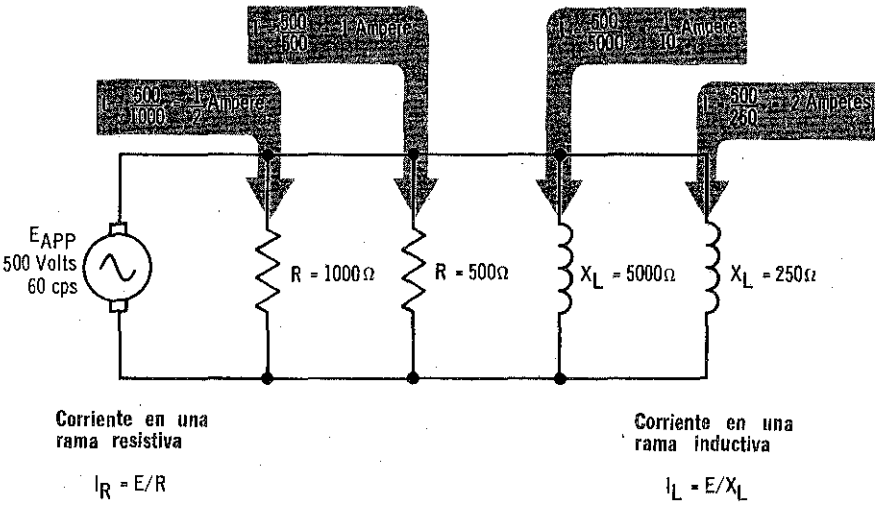
E_{APP}, E_R, y E_L

Si se conoce el voltaje en un circuito en paralelo RL, automáticamente se conocen los otros voltajes, ya que todos son idénticos

Se recordará que en circuitos en *serie* RL, la *corriente* era la cantidad común, ya que era la misma tanto en la parte resistiva como en la inductiva del circuito. En circuitos en *paralelo* RL, la *tensión* es la cantidad común, puesto que la misma tensión está aplicada a las ramas resistiva e inductiva. Las corrientes de rama no son iguales. Por lo tanto, se usa la tensión como referencia cero para comparar los demás ángulos.

corrientes de rama

La corriente en cada rama de un circuito en paralelo RL es independiente de las otras ramas, y puede calcularse por medio de la ley de Ohm



Corriente en una rama resistiva

$I_R = E/R$

Corriente en una rama inductiva

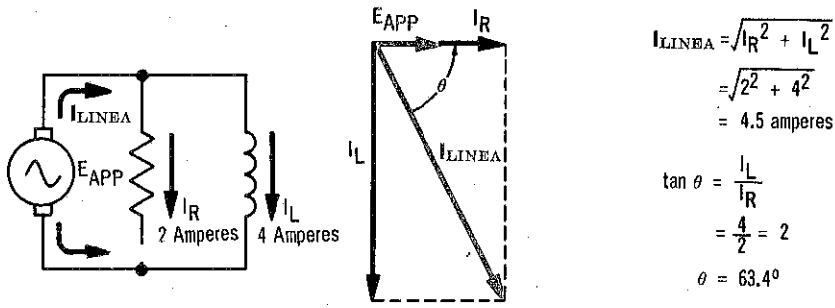
$I_L = E/X_L$

Como en todos los circuitos en paralelo, la corriente en cada rama de un circuito en paralelo RL es *independiente* de las corrientes en las demás ramas. Si una de las ramas se abre, no habrá efecto alguno en la corriente de las demás ramas. La corriente en cada una de ellas depende sólo de la tensión en los extremos de las ramas y la oposición al flujo de corriente, ya sea en forma de resistencia o de reactancia inductiva que haya en la rama. Las tensiones en todas las ramas son iguales, de manera que el valor de la resistencia o de la reactancia inductiva es lo que determina la cantidad relativa de corriente en cada una de ellas. Cada rama de un circuito en paralelo RL se puede considerar como un pequeño circuito en serie independiente. Entonces puede usarse la ley de Ohm para encontrar las corrientes en cada una de las ramas. Por lo tanto, en las ramas resistivas la corriente es igual a la tensión en la rama que es igual a la tensión aplicada, dividida entre la resistencia. En las ramas inductivas, la corriente es igual a la tensión de las ramas dividida entre la reactancia inductiva; así pues,

$$I_R = \frac{E}{R} \qquad I_L = \frac{E}{X_L}$$

La corriente de línea en un circuito en paralelo RL es igual a la SUMA VECTORIAL de las corrientes en las ramas resistiva e inductiva

Circuito **Representación vectorial** **Cálculos**



$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$
$$= \sqrt{2^2 + 4^2}$$
$$= 4.5 \text{ amperes}$$

$$\tan \theta = \frac{I_L}{I_R}$$
$$= \frac{4}{2} = 2$$
$$\theta = 63.4^\circ$$

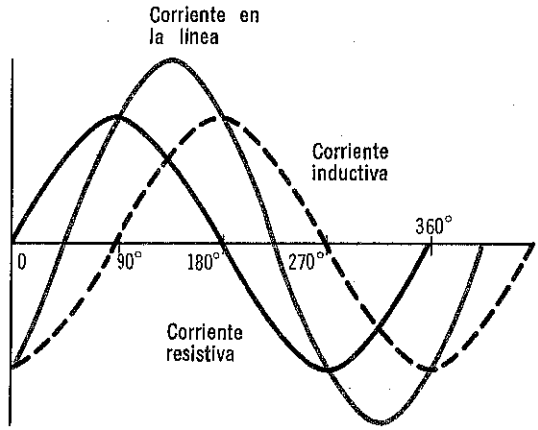
corriente de línea

En circuitos en paralelo puramente resistivos, la corriente total del circuito, o corriente de la línea según se le llama, es simplemente la *suma aritmética* de todas las corrientes de rama. Sin embargo, en circuitos en paralelo RL existe una *diferencia de fase* entre la corriente de la rama resistiva y la corriente en la rama inductiva. Debido a la diferencia de fase, se deben sumar *vectorialmente* las corrientes de rama, para determinar la corriente en la línea. La naturaleza de la diferencia de fase entre las dos corrientes es tal que la corriente en la rama *resistiva* está *adelantada* 90 grados con respecto a la corriente en la rama *inductiva*. Esto se debe a que las tensiones en las ramas están en fase y la corriente en la rama resistiva está en fase con la tensión, en tanto que la corriente en la rama inductiva está 90 grados atrasada con respecto a esa tensión.

Debido a que las dos corrientes están defasadas 90 grados entre sí, su suma vectorial, que constituye la corriente en la línea, se puede calcular aplicando el teorema de Pitágoras, por medio de la siguiente ecuación:

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

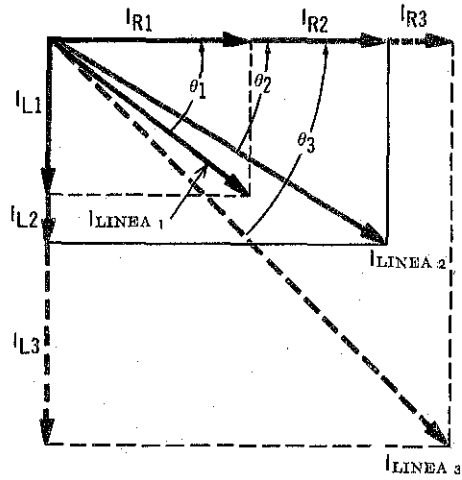
La corriente de línea es la suma vectorial de las corrientes resistiva e inductiva



La corriente resistiva está adelantada 90° con respecto a la corriente inductiva

corriente de línea (cont.)

El ángulo de fase entre la corriente en la línea y la tensión aplicada tiene un valor entre cero y 90 grados, y la corriente está atrasada con respecto a la tensión, como en todos los circuitos RL. El ángulo que resulte depende de si hay más corriente en la rama inductiva o en la resistiva. Si hay más corriente en la rama inductiva, la fase de la corriente de la línea se aproximará más a 90 grados. Se aproximará más a cero grados si hay más corriente en la rama resistiva.



La corriente de línea en un circuito en paralelo RL tendrá un ángulo de fase entre 0 y 90°, atrasado. El valor depende de los valores relativos de las corrientes inductiva y resistiva en las ramas

Si una de las corrientes, ya sea la de la rama resistiva o la de la inductiva, es 10 veces mayor que la otra, se puede considerar que la corriente en la línea tiene un ángulo de fase de 0, o bien de 90 grados, según sea el caso. Del diagrama vectorial, es fácil deducir que el valor del ángulo de fase se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\tan \theta = I_L/I_R$$

Otras ecuaciones muy útiles para calcular el ángulo de fase de derivan substituyendo las relaciones $I_L = E/X_L$ e $I_R = E/R$ en la ecuación anterior. Las ecuaciones derivadas de esta manera son:

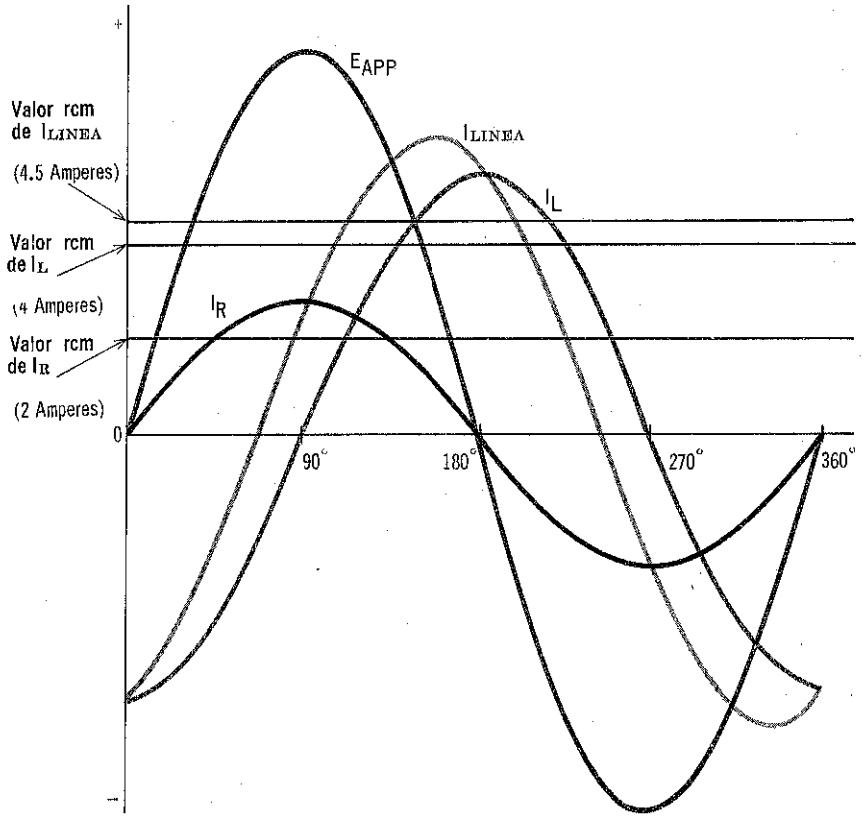
$$\tan \theta = R/X_L \qquad \text{y} \qquad \cos \theta = Z/R$$

Si se conocen la impedancia de un circuito en paralelo RL y la tensión aplicada, también puede calcularse la corriente en la línea mediante la ley de Ohm para circuitos de c-a:

$$I_{LINEA} = E/Z$$

formas de onda de corriente

Puesto que las corrientes de rama de un circuito en paralelo RL están defasadas entre sí, su suma vectorial y no su suma aritmética simple, es igual a la corriente en la línea. Esta situación es del mismo tipo que la que existe para caídas de tensión en un circuito en serie RL. Si se suman vectorialmente las corrientes, se suman todos los valores instantáneos y luego se encuentra el valor medio o el valor efectivo de la corriente resultante. Esto puede verse en las formas de onda de corriente mostradas. Estas son las formas de onda para el circuito que ha sido resuelto en las páginas anteriores.



Todo punto en la onda de corriente de línea (I_{LINEA}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las ondas I_R e I_L. El valor rcm de la onda de corriente de línea es igual a la suma vectorial de los valores de rcm de las ondas I_R e I_L

impedancia

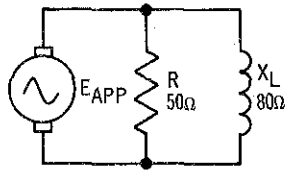
La impedancia Z de un circuito en paralelo RL, es la oposición total al flujo de corriente, presentado por la resistencia de la rama resistiva y la reactancia inductiva de la rama correspondiente. La impedancia de un circuito en paralelo RL se calcula en forma semejante a un circuito resistivo en paralelo. Sin embargo, como X_L y R son magnitudes vectoriales, deben sumarse *vectorialmente*. Como resultado, la ecuación mediante la cual se obtiene la impedancia de un circuito en paralelo RL, es:

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

donde la cantidad que aparece en el denominador es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia inductiva. Si hay más de una rama resistiva o inductiva, R y X_L deben ser iguales a la resistencia o a la reactancia *totales* de estas ramas en paralelo.

En un circuito en paralelo RL

Circuito



$$Z = \frac{R \times X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Cálculos

$$Z = \frac{R \times X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$= \frac{50 \times 80}{\sqrt{(50)^2 + (80)^2}} = \frac{4000}{94.4}$$

$$= 42 \text{ ohms}$$

La impedancia de un circuito en paralelo RL siempre es menor que la resistencia o la reactancia inductiva de cualquiera de las ramas

Si se conocen la corriente de línea del circuito y la tensión aplicada, también se puede calcular la impedancia aplicando la ecuación:

$$Z = E_{AP}/I_{LINEA}$$

La impedancia de un circuito en paralelo RL siempre es *menor* que la resistencia o la reactancia de una de las ramas. La rama de un circuito en paralelo RL que ofrece mayor oposición al flujo de corriente tiene *menos efecto* sobre el ángulo de fase de la corriente. Por ejemplo, si X_L es mayor que R, la corriente en la rama resistiva será mayor que la corriente de la rama inductiva, de manera que la corriente en la línea también será más resistiva (más próxima a 0°). Este fenómeno es opuesto al que se observa en un circuito en serie RL. En la práctica, cuando X_L es 10 o más veces que R o viceversa se puede considerar que un circuito en paralelo RL es un circuito en serie simple que sólo tiene X_L o R —la que sea *menor*.

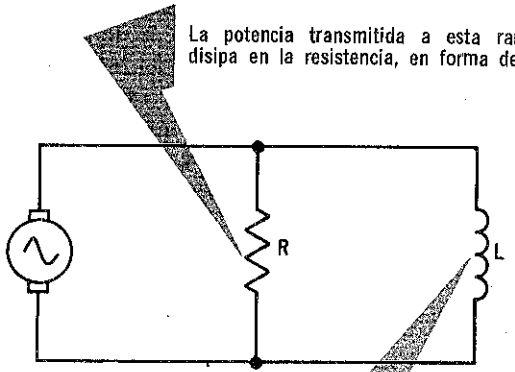
potencia

En circuitos en paralelo RL, la relación entre la tensión aplicada, la corriente del circuito y la potencia del circuito son similares a las que existen en circuitos en serie RL, descritas anteriormente. Debido a la diferencia de fase que hay entre las corrientes de rama, la corriente en la línea y la tensión aplicada están defasadas entre sí. Como resultado de ello, el valor de la potencia obtenida al multiplicar la tensión aplicada por la corriente de la línea sólo es la *potencia aparente*. Parte de esta potencia aparente *regresa* de la rama inductiva a la fuente. Así, pues, para determinar la potencia disipada efectivamente en el circuito, o sea la *potencia real*, la potencia aparente debe multiplicarse por el coseno del ángulo de fase (θ) entre la tensión aplicada y la corriente en la línea. El valor de coseno θ es el *factor de potencia* del circuito.

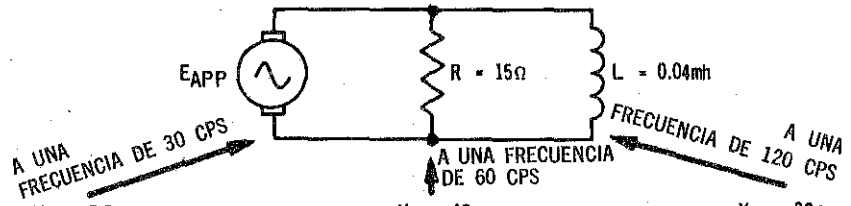
Potencia aparente = EI_{LINEA} o E^2/Z o $I^2_{LINEA}\,Z$

Potencia real = $EI_{LINEA} \cos \theta$ o $(E^2/Z) \cos \theta$ o $I^2Z \cos \theta$

$\tan \theta = R/X_L$ o I_L/I_R $\qquad$ $\cos \theta = Z/R$



Las características de un circuito en paralelo RL varían con diferentes frecuencias



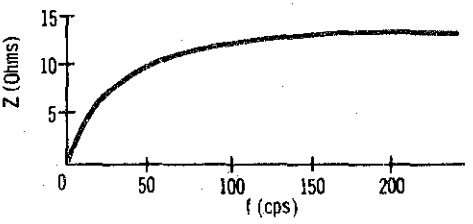
Al aumentar la frecuencia, la impedancia se acerca más y más al valor de la resistencia

efecto de la frecuencia

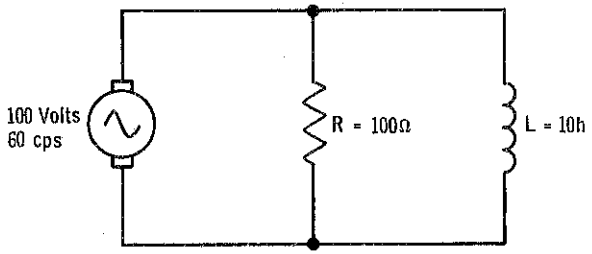
Téngase presente que la frecuencia de la tensión aplicada tiene un efecto significativo sobre las características de un circuito en serie RL. Lo mismo ocurre con circuitos en paralelo RL, pero los *efectos* de los cambios de frecuencia, son *diferentes*. En un circuito en serie, un aumento en la frecuencia causa un aumento en los valores de X_L y Z, lo que hace más inductivo al circuito. El aumentar la frecuencia de un circuito en paralelo RL, produce también un aumento en los valores de X_L y Z. Sin embargo, en tanto que en un circuito en *serie* una X_L mayor hace *más inductivo* al circuito, el aumento de X_L en un circuito en *paralelo*, hace *más resistivo* al circuito. Esto se debe a que cuanto mayor sea X_L, menor será la corriente en la rama inductiva, por lo que será mayor el valor relativo de la corriente en la rama resistiva.

Si disminuye la frecuencia, sucede el fenómeno opuesto. X_L se vuelve menor, causando un aumento en la corriente de la rama inductiva, con lo que el circuito se hace más inductivo. Por lo tanto, *a frecuencias muy bajas* un circuito paralelo RL será casi exclusivamente *inductivo*; en tanto que a *frecuencias muy altas*, será casi exclusivamente *resistivo*. Si la frecuencia es tal que X_L es 10 veces mayor que R o viceversa, puede hacerse caso omiso de la rama que tiene a la magnitud mayor y tratar el circuito como si fuera un circuito en serie que contenga sólo la menor de las dos.

La curva de respuesta de frecuencia del circuito anterior



problemas resueltos



Problema 10. Calcular la corriente en la línea del circuito mostrado, de dos maneras: primero, mediante la ley de Ohm y, segundo, a partir de las corrientes de rama.

Para calcular la corriente en la línea mediante la ley de Ohm, se usa la ecuación $I_{LINEA} = E/Z$. Sin embargo, antes de que esto pueda hacerse, debe encontrarse la impedancia. La ecuación que da la impedancia es $Z = RX_L/\sqrt{R^2 + X_L^2}$. R está dada en el enunciado del problema, pero no así X_L, de manera que primero debe determinarse X_L. Esto significa que, para resolver el problema, debe calcularse primeramente X_L, luego Z, y finalmente, la corriente en la línea.

Cálculo de X_L:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 60 \times 10 = 3{,}768 \text{ ohms}$$

Cálculo de Z:

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{1{,}000 \times 3{,}768}{\sqrt{(1{,}000)^2 + (3{,}768)^2}} = 966 \text{ ohms}$$

Cálculo de I_{LINEA}:

$$I_{LINEA} = E/Z = 100 \text{ volts}/966 \text{ ohms} = 0.104 \text{ amperes}$$

Para calcular la corriente en la línea a partir de las corrientes en las ramas, deben determinarse antes que nada las corrientes de ambas ramas. La suma vectorial de estas dos corrientes darán entonces la corriente en la línea.

Cálculo de las corrientes en las ramas:

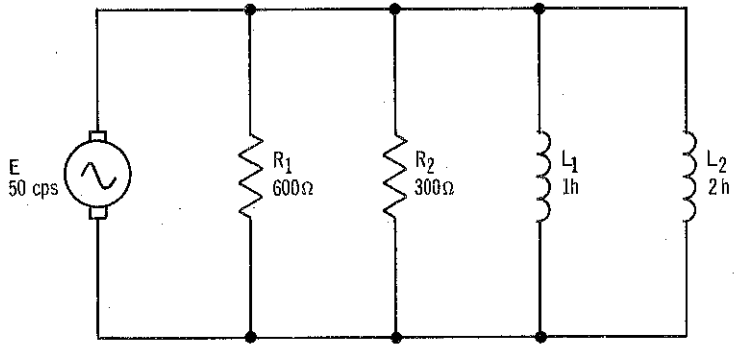
$$I_R = E/R = 100 \text{ volts}/1{,}000 \text{ ohms} = 0.1 \text{ ampere}$$
$$I_L = E/X_L = 100 \text{ volts}/3{,}768 \text{ ohms} = 0.0265 \text{ ampere}$$

Cálculo de I_{LINEA}:

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{(0.1)^2 + (0.0265)^2} = 0.104 \text{ ampere}$$

Por lo tanto, mediante ambos métodos se obtiene el mismo valor para la corriente en la línea, como era de esperarse. Se encontrará que muchos, si no la mayoría de los problemas en electricidad, pueden resolverse en más de una manera. Cuando se resuelven estos problemas, una buena práctica consiste en aplicar dos métodos distintos, siempre que el tiempo lo permita; las dos respuestas que se obtengan deben coincidir y servirán para comprobar la precisión de los cálculos.

problemas resueltos (cont.)



Problema 11. En el circuito de la figura, ¿cuál es el ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente en la línea?

El ángulo de fase se puede calcular por medio de las ecuaciones $\tan\theta = I_L/I_R$, $\tan\theta = R/X_L$, ó $\cos\theta = Z/R$. Puesto que se ignora la tensión aplicada no se puede usar la ecuación $\tan\theta = I_L/I_R$. De las otras dos ecuaciones la más fácil de usar en este caso es $\tan\theta = R/X_L$; sin embargo, antes de que se pueda aplicar para resolver el ángulo de fase, deben determinarse los valores totales de R y X_L.

Cálculo de R_{TOT}: Las dos resistencias están en paralelo, de manera que se usa el método producto/suma para determinar el total.

$$R_{TOT} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{600 \times 300}{600 + 300} = 200 \text{ ohms}$$

Cálculo de $X_{L\,TOT}$: Primero deben determinarse los valores de X_{L1} y X_{L2}:

$$X_{L1} = 2\pi fL = 6.28 \times 50 \times 1 = 314 \text{ ohms}$$
$$X_{L2} = 2\pi fL = 6.28 \times 50 \times 2 = 628 \text{ ohms}$$

Las dos reactancias están en paralelo, de manera que es factible aplicar también el método producto/suma para determinar el total.

$$X_{L\,TOT} = \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} = \frac{314 \times 628}{314 + 628} = 209 \text{ ohms}$$

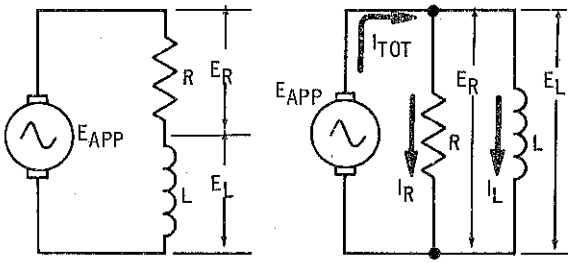
Cálculo de θ:

$$\tan\theta = \frac{R_{TOT}}{X_{L\,TOT}} = \frac{200}{209} = 0.957$$

Ahora es fácil determinar θ a partir de una tabla de funciones trigonométricas:

$$\theta = 43.7°$$

comparación de circuitos RL en serie y en paralelo



	Circuito RL en serie	Circuito RL en paralelo
Corriente	La corriente es la misma en todas las partes del circuito. Por lo tanto, la corriente en R y en L está en fase.	La corriente se divide entre las ramas resistiva e inductiva. $I_{TOT} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$ $I_R = E_{AP}/R$ $I_L = E_{AP}/X_L$ La corriente en R está adelantada 90° con respecto a la corriente en L.
Tensión	La suma vectorial de las caídas de tensión en R y en L es igual a la tensión aplicada. $E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$ La tensión en L está adelantada 90° con respecto a la tensión en R.	La tensión en cada una de las ramas es la misma que la tensión aplicada. La tensión en R y en L, por lo tanto, está en fase. $E_R = E_L = E_{AP}$
Impedancia	Es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia inductiva. $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	Se calcula de la misma manera que las resistencias en paralelo, excepto porque se emplea la suma vectorial. $Z = RX_L/\sqrt{R^2 + X_L^2}$
Angulo de fase (θ)	Es el ángulo entre la corriente del circuito y la tensión aplicada. $\tan\theta = E_L/E_R = X_L/R$ $\cos\theta = R/Z$	Es el ángulo entre la tensión aplicada y la corriente en la línea. $\tan\theta = I_L/I_R = R/X_L$ $\cos\theta = Z/R$
Potencia	La potencia transmitida por la fuente es potencia aparente. La potencia consumida efectivamente en el circuito, es potencia real. El factor de potencia determina qué parte de la potencia aparente es potencia real $P_{APARENTE} = E_{AP}I$ $P_{VERDADERA} = E_{AP}I\cos\theta$ P. F. $= \cos\theta$	
Efecto del aumento de frecuencia	X_L aumenta, lo que a su vez hace que la corriente del circuito disminuya. El ángulo de fase aumenta, lo que significa que el circuito se vuelve más inductivo.	X_L aumenta, la corriente en la rama inductiva disminuye de manera que la corriente en la línea también disminuye. El ángulo de fase disminuye, lo cual significa que el circuito se vuelve más resistivo.
Efecto de aumentar la resistencia	El ángulo de fase disminuye, lo cual significa que el circuito es más resistivo.	El ángulo de fase aumenta, lo cual significa que el circuito es más inductivo.
Efecto de aumentar la inductancia	El ángulo de fase aumenta, esto significa que el circuito es más inductivo.	El ángulo de fase disminuye, lo cual significa que el circuito es más resistivo.

resumen

☐ En un circuito en paralelo simple RL hay una rama resistiva y una rama inductiva. ☐ La corriente del circuito en un circuito en paralelo RL se divide antes de entrar a las ramas, pasando una parte a través de la rama resistiva, en tanto que el resto fluye por la rama inductiva. ☐ La corriente que pasa por una rama es independiente de la corriente en la otra. ☐ Ambas ramas están conectadas directamente a la fuente de tensión. ☐ La tensión se usa como vector de referencia cero, ya que es la magnitud común en el circuito en paralelo RL.

☐ La corriente en la rama resistiva de un circuito en paralelo RL se encuentra de acuerdo con la expresión $I_R = E/R$. ☐ La corriente en la rama inductiva se encuentra aplicando la expresión $I_L = E/X_L$. ☐ La corriente en la línea se encuentra sumando vectorialmente las corrientes de rama: $I_{LINEA} = \sqrt{I_R{}^2 + I_L{}^2}$. ☐ La corriente de línea también se puede encontrar aplicando: $I_{LINEA} = E/Z$. ☐ El ángulo de fase de un circuito en paralelo RL se obtiene por: $\tan \theta = I_L/I_R$; ó $\tan \theta = R/X_L$; ó $\cos \theta = Z/R$. ☐ La impedancia de un circuito en paralelo RL se encuentra sumando vectorialmente las oposiciones en paralelo. La ecuación que da la impedancia es $Z = RX_L/(R^2 + XL^2)$. También se puede determinar la impedancia según: $Z = E_{AP}/I_{LINEA}$.

☐ Las ecuaciones de la potencia para circuitos en paralelo RL son idénticas a las empleadas en circuitos en serie RL. ☐ Como la reactancia inductiva aumenta al aumentar la frecuencia, el circuito en paralelo RL se vuelve más resistivo al aumentar la frecuencia.

preguntas de repaso

1. ¿Qué se entiende por *corriente de línea*, en un circuito en paralelo RL?

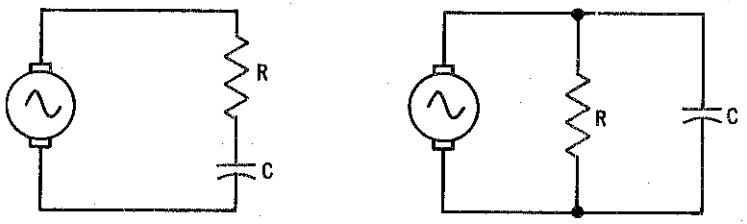
Para las preguntas 2 a 10, suponga un circuito en paralelo RL con una tensión aplicada de 100 volts, un resistor con resistencia de 10 ohms y un inductor con reactancia inductiva de 20 ohms.

2. ¿Cuál es la corriente en el resistor? ¿Cuál es en el inductor?
3. ¿Cuál es la tensión en el resistor? ¿Cuál es en el inductor?
4. ¿Cuál es la impedancia del circuito?
5. ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito?
6. ¿Cuál es la potencia aparente? ¿Cuál es la potencia real? ¿Cuál es el factor de potencia?
7. ¿Cuál es el valor de la corriente de línea?
8. ¿Por cuál factor debe multiplicarse la frecuencia para que el circuito paralelo se convierta efectivamente en un circuito resistivo?
9. Responda las preguntas 3 a 5, para el caso de que la frecuencia se duplique.
10. Responda las preguntas 5 a 7 para el caso de que la frecuencia se triplique.

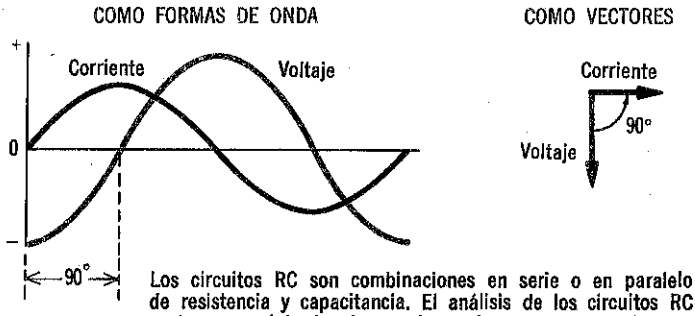
circuitos RC

Un circuito con *resistencia* (R) y *capacitancia* (C) se conoce como *circuito* RC. Los métodos que se usan para resolver circuitos RC dependen de si la resistencia y la capacitancia están en *serie* o en *paralelo*. Esto es similar a lo que ya se ha visto en relación con los circuitos RL. De hecho, las condiciones que existen en los circuitos RC y los métodos que se aplican para resolverlos son muy similares a los que se emplean en circuitos RL. La diferencia principal estriba en la *relación de fase*, ya que, según se recordará de lo estudiado en el volumen 3, la relación de fase entre corriente y tensión en un circuito capacitivo es diferente de la que existe en un circuito inductivo.

Circuitos RC



Corriente y voltaje en un capacitor

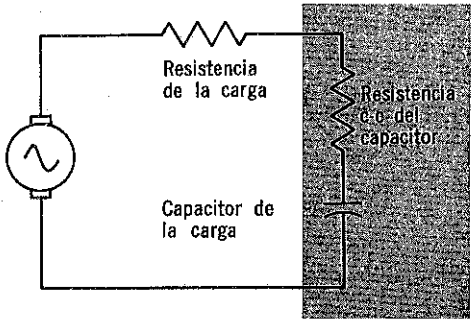


Los circuitos RC son combinaciones en serie o en paralelo de resistencia y capacitancia. El análisis de los circuitos RC se basa en el hecho de que la corriente en un circuito puramente capacitivo está adelantada 90° con respecto al voltaje

Por lo general, un circuito RC es aquel que contiene resistores y capacitores. Sin embargo, cualquier circuito real tiene algo de resistencia en el alambrado del circuito y algo de capacitancia entre conductores o entre el alambrado y las partes metálicas circundantes. Por lo tanto, los circuitos RC existen en realidad, aun cuando no se utilicen resistores o capacitores; aunque, en estos casos, los valores de la resistencia y la capacitancia generalmente son muy pequeños. Por esa razón, en este volumen, se hará caso omiso tanto de la resistencia como de la capacitancia del alambrado del circuito.

circuitos en serie RC

En un circuito en serie RC, una o más resistencias están conectadas en serie con una o más capacitancias, de manera que la *corriente total* del circuito fluye a través de *cada una* de las componentes. En las siguientes páginas, para el estudio de tensión, impedancia y corriente en circuitos RC, se considerará el caso de *una sola resistencia* en serie con *una sola capacitancia*, a menos que se especifique otra cosa. Cuando hay más de una resistencia o capacitancia, el análisis del circuito es igual, salvo que en ese caso la resistencia o capacitancia única se convierte a la resistencia o capacitancia total.



Todo capacitor tiene fugas, ocasionadas por la resistencia del capacitor de c-c. Normalmente, la resistencia de un capacitor de c-c es muy alta, de manera que, esencialmente, el capacitor funciona como un capacitor ideal, dejando pasar a la c-a y bloqueando a la c-c

De lo estudiado en el volumen 3, se recordará que todo capacitor tiene cierta *fuga*, formada por una pequeña cantidad de corriente que pasa a través del dieléctrico. Efectivamente, la corriente de fuga destruye la relación de 90° entre la tensión en las terminales del capacitor y la corriente que pasa a través de él, de manera que la corriente, en realidad, está adelantada con respecto a la tensión por un ángulo de fase menor que 90°. Sin embargo, en la mayor parte de los capacitores, la corriente de fuga es tan pequeña que, para toda aplicación práctica, se puede considerar que el ángulo de fase es de 90°. Por lo tanto, en este volumen, los capacitores sin fugas y la corriente del capacitor se considerarán adelantados 90° con respecto a la tensión.

En la descripción de circuitos en serie RC de las páginas que siguen, se usará la corriente del circuito como la referencia de fase para todas las demás magnitudes del circuito, tal como se hizo en circuitos en serie RL. También en este caso, la selección de las corrientes se hace por conveniencia, ya que es la misma en todas las partes del circuito. Cuando se usa como referencia la corriente, los vectores de todas las magnitudes que están en fase con la corriente tendrán la misma dirección que el vector de corriente: 0°.

tensión

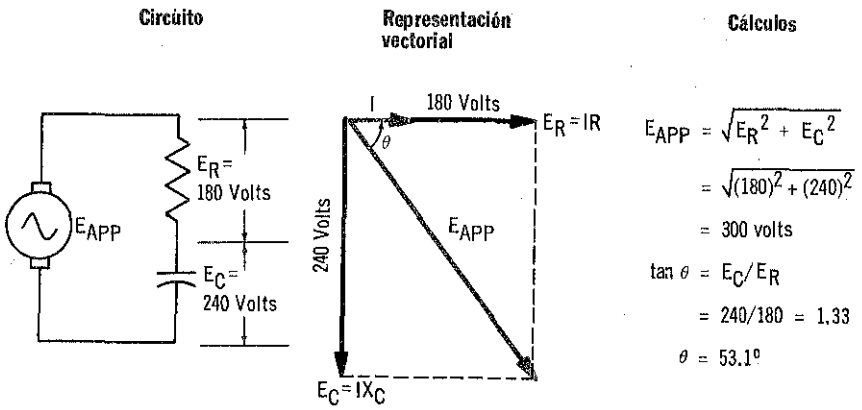
Cuando fluye corriente en un circuito en serie RC, la caída de tensión en la resistencia (E_R) está en fase con la corriente, en tanto que la caída de tensión en la capacitancia (E_C) está atrasada 90° con respecto a la corriente. Puesto que la corriente en ambos es la misma, E_R estará adelantada 90° con respecto a E_C. Las amplitudes de las dos caídas de tensión se pueden calcular entonces por la siguiente fórmula:

$$E_R = IR$$
$$E_C = IX_C$$

Igual que los circuitos en serie RL, la *suma vectorial* de las caídas de tensión *es igual* a la tensión aplicada. Expresado en forma de ecuación:

$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$$

La relación entre el voltaje aplicado y las caídas de voltaje en un circuito en serie RC es tal que el voltaje aplicado es igual a la SUMA VECTORIAL de las caídas de voltaje



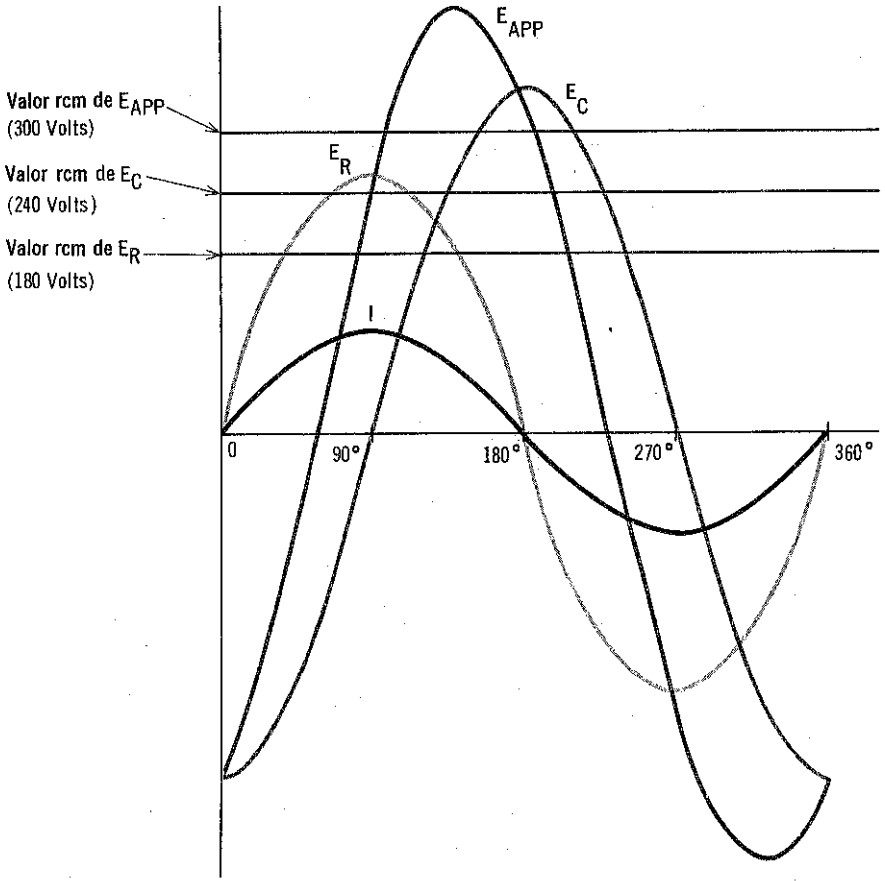
Si una de las caídas de voltaje cambiara como resultado de un cambio ya sea en R o X_C, el ángulo del vector del voltaje aplicado también parecería cambiar. En realidad, es la corriente la que cambia de fase; esto es lo mismo que se ha señalado para los circuitos RL en serie. Para evitar confusión, considere siempre que el ángulo θ es el ángulo entre I y E_{AAP}

Gráficamente, la tensión aplicada es la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos son las caídas de tensión E_R y E_C. El ángulo (θ) de este triángulo vectorial entre la tensión aplicada y E_R es igual al ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente. Esto se debe a que E_R e I están en fase. El valor de θ se puede calcular a partir de:

$$\tan \theta = E_C/E_R \qquad \cos \theta = E_R/E_{AP}$$

ondas de tensión

Las ondas de las tensiones en un circuito en serie RC son similares a las que se han visto para un circuito en serie RL. Muestran cómo la onda de tensión aplicada es la suma de todos los puntos instantáneos de las dos ondas de caída de tensión. También indican que los valores medio y efectivo de la onda de tensión aplicada son iguales a las respectivas sumas vectoriales de los valores medio y efectivo de las ondas de caída de tensión. Esto queda ilustrado en el circuito resuelto en la página anterior.



Todo punto sobre la forma de onda de voltaje aplicado (E_{APP}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las formas de onda E_R y E_C

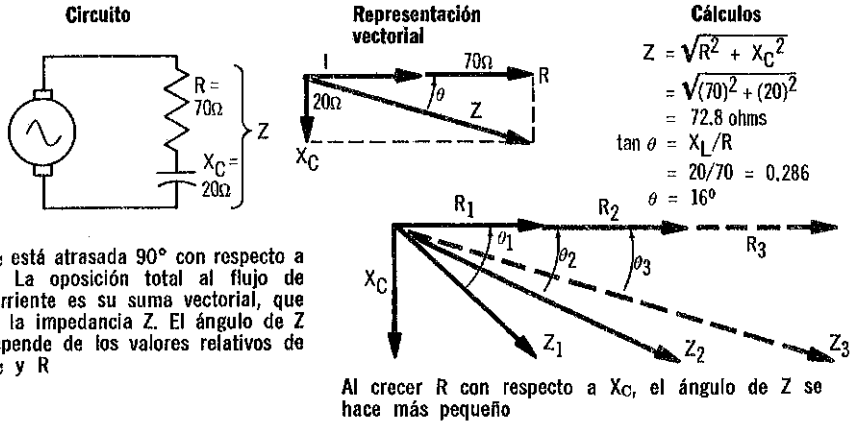
impedancia

La impedancia de un circuito en serie RC es la oposición *total* al flujo de corriente que ofrecen la resistencia del circuito y la reactancia capacitiva. Se calcula de la misma manera que la impedancia en el caso de un circuito en serie RL, excepto porque se usa la reactancia capacitiva en lugar de la reactancia inductiva. Por lo tanto, la ecuación para calcular la impedancia de un circuito serie RC es

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

En la adición vectorial se toma en cuenta la diferencia de fase de 90° que hay entre la caída de tensión en la resistencia y la existente en la capacitancia.

En un circuito en serie RC, la impedancia es la SUMA VECTORIAL de la resistencia y la reactancia capacitiva



X_C está atrasada 90° con respecto a R. La oposición total al flujo de corriente es su suma vectorial, que es la impedancia Z. El ángulo de Z depende de los valores relativos de X_C y R

Al crecer R con respecto a X_C, el ángulo de Z se hace más pequeño

Como R y X_C difieren en 90° y R está adelantada, el ángulo de fase de Z tendrá algún valor entre 0 y 90°. El ángulo exacto depende de los valores *relativos* de R y X_C. Si R es mayor, Z se aproxima más a 0°; si X_C es mayor, Z se aproximará más a 90°. El valor del ángulo se puede calcular mediante cualquiera de las ecuaciones siguientes:

$$\tan \theta = X_C/R \qquad \text{ó} \qquad \cos \theta = R/Z$$

El ángulo de fase de Z es igual al ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente. De manera que si se conoce uno, automáticamente se conocerá el otro.

Igual que en el caso de circuitos en serie RL, se aplica la regla de 10 a 1 a la impedancia de circuitos RC. Esto significa que si de X_C ó R, una de ellas es 10 o más veces mayor que la otra, el circuito funcionará esencialmente como si sólo hubiese la mayor de ambas magnitudes.

corriente

La amplitud de la corriente en un circuito en serie RC se puede calcular a partir de la ley de Ohm si se conocen la tensión aplicada y la impedancia. Así, pues,

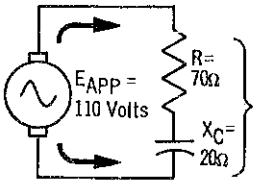
$$I = E_{AP}/Z \qquad \text{donde} \qquad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Puesto que la corriente es *la misma en todo* el circuito, se usa como referencia de fase. De manera que el ángulo entre ella y la impedancia determina si la corriente es más resistiva o más capacitiva. Téngase presente que este ángulo tiene un valor entre 0 y 90°, dependiendo su valor exacto de los valores *relativos* de la resistencia y la reactancia capacitiva. Cuanto *mayor* sea X_C, en comparación con R, más se acercará el ángulo a 90 *grados* y la corriente será más *capacitiva*; en forma similar, cuanto *menor* sea X_C en comparación con R, tanto más se aproximará el ángulo a 0 *grados* y la corriente será más *resistiva*. Si X_C es 10 o más veces mayor que R, la corriente se puede considerar puramente capacitiva, por lo que estará adelantada 90° con respecto a la tensión aplicada; en tanto que si R es 10 o más veces mayor que X_C, se puede considerar que la corriente es exclusivamente resistiva y, en consecuencia, que está en fase con la tensión aplicada.

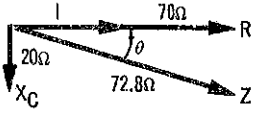
Se puede calcular la potencia del circuito mediante las mismas ecuaciones que se estudiaron en el caso de circuitos RL.

En un circuito en serie RC, la corriente es la misma en todos los puntos y está adelantada con respecto al voltaje con un ángulo que se encuentra entre 0 y 90°

Circuito



Representación vectorial

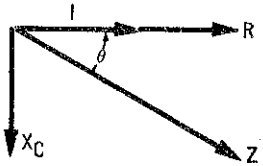


Cálculos

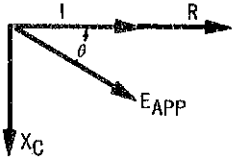
$I = E_{APP}/Z$
$= 110/72.8$
$= 1.5$ amperes
$\tan\theta = X_C/R$
$= 20/70 = 0.286$
$\theta = 16°$

El ángulo calculado aquí es el ángulo de fase de la corriente. Nótese que es igual al ángulo de la impedancia que se encontró para el mismo circuito en la página anterior. Este se debe a que el valor de X_C y R determina el ángulo de la impedancia, que a su vez determina si la corriente es capacitiva o resistiva

El ángulo entre Z y R



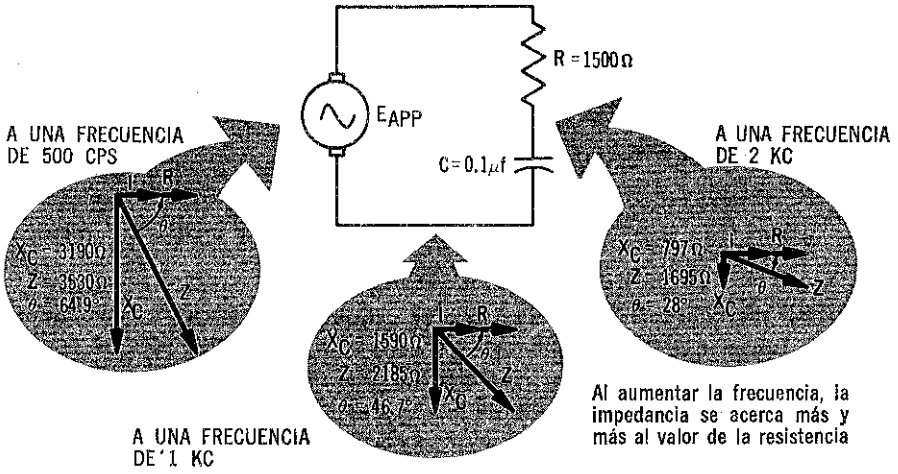
es igual al ángulo entre Z e I



que es igual al ángulo entre E_{APP} e I

θ SIEMPRE ESTA DETERMINADO POR X_C Y R

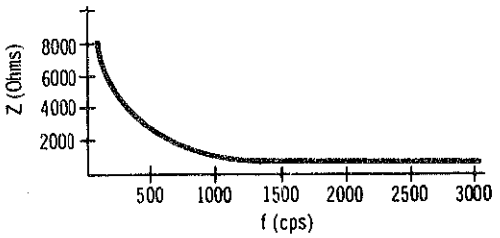
Las características de un circuito en serie RC varían según las diferentes frecuencias



efecto de frecuencia

Puesto que el valor de X_C en un circuito en serie RC *cambia* de acuerdo con la *frecuencia,* todas las propiedades del circuito que son afectadas por X_C también cambian según la frecuencia. Estas propiedades que dependen de la frecuencia son la *impedancia,* la amplitud y el ángulo de fase de la *corriente* y el factor de potencia del circuito. Puesto que el valor de X_C es inversamente proporcional a la frecuencia, un aumento en ésta ocasiona una disminución en X_C, en tanto que una disminución en la frecuencia hace que X_C aumente. Como resultado, cuando la frecuencia aumenta, disminuye la impedancia, aumenta la corriente del circuito, que se vuelve más resistivo, y el factor de potencia se aproxima más a 1. Recíprocamente, cuando la frecuencia desciende, aumenta la impedancia, disminuye la corriente del circuito, que se vuelve más capacitivo, y el factor de potencia se aproxima más a cero.

Esta es la curva de respuesta de frecuencia del circuito. A frecuencias muy bajas, Z es prácticamente infinito; mientras más alta sea la frecuencia, menor será la impedancia, acercándose al valor de R, sin llegar nunca a él



problemas resueltos

Problema 12. ¿Cuál es la tensión aplicada en el circuito de la figura?

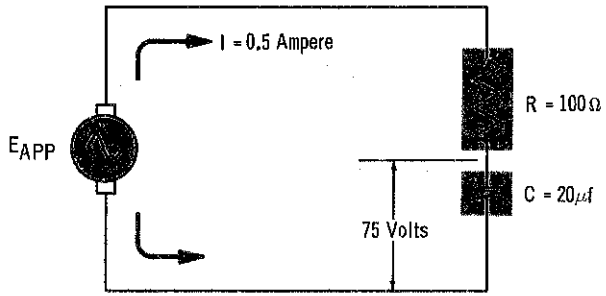
La tensión aplicada es la incógnita que debe calcularse. Por lo tanto, el primer paso es considerar las ecuaciones del cálculo de la tensión aplicada. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$E_{AP} = IZ$$

y

$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$$

A partir de la información dada en el diagrama del circuito que sigue, resulta obvio que no es aplicable la ecuación $E_{AP} = IZ$, ya que, para encontrar Z, debe conocerse el valor de X_C. A su vez, para encontrar el valor de X_C, debe conocerse la frecuencia de la tensión aplicada, información que no está dada.



Por lo tanto, la tensión aplicada sólo se puede determinar mediante la ecuación $E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$. Sin embargo, antes de que se pueda hacer esto debe calcularse la caída de tensión en la resistencia.

Cálculo de E_R:

$$E_R = IR = 0.5 \text{ ampere} \times 100 \text{ ohms} = 50 \text{ volts}$$

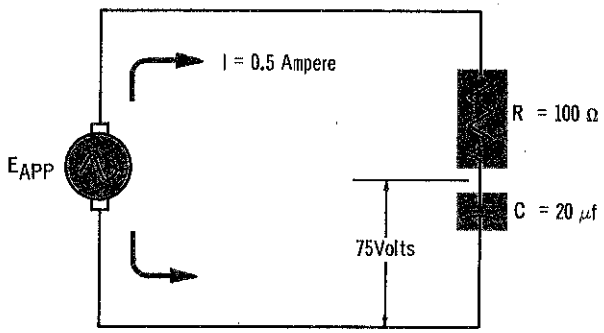
Cálculo de E_{AP}:

$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2} = \sqrt{(50)^2 + (75)^2} = \sqrt{8{,}125} = 90 \text{ volts}$$

Problema 13. ¿Cuál es la impedancia del circuito?

Antes de calcular la tensión aplicada, no se podía determinar la impedancia, debido a que, en la ecuación para calcular la impedancia, $Z = E_{AP}/I$, el valor de E_{AP} no se conocía, en tanto que en la ecuación $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, no se conocía el valor de X_C. Sin embargo, ahora que se ha calculado la tensión aplicada, E_{AP}, se puede determinar fácilmente la impedancia:

$$Z = E_{AP}/I = 90 \text{ volts}/0.5 \text{ ampere} = 180 \text{ ohms}$$



problemas resueltos (cont.)

Problema 14. ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito?

Como se sabe, las tres ecuaciones que se usan comúnmente para calcular el ángulo de fase, θ, son las siguientes:

$$\cos\theta = R/Z \qquad \tan\theta = X_C/R \qquad \tan\theta = E_C/E_R$$

La segunda ecuación no es aplicable a este problema ya que no se conoce el valor de X_C. Sin embargo, se tiene la información suficiente para usar cualquiera de las otras dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= R/Z = 100/180 = 0.555 \\ \theta &= 56.3° \\ \tan\theta &= E_C/E_R = 75/50 = 1.500 \\ \theta &= 56.3° \end{aligned}$$

Problema 15. ¿Cuál es la frecuencia de la fuente de energía en el circuito?

La única forma en que se puede calcular la frecuencia es conociendo el valor de X_C. Este se puede calcular mediante la ecuación para la caída de tensión C, ya que se conocen tanto I como E_C. Así, pues,

$$E_C = IX_C$$

de manera que

$$X_C = E_C/I = 75/0.500 = 150 \text{ ohms}$$

Ya conocido el valor de X_C, se puede determinar la frecuencia mediante la ecuación para el cálculo de la reactancia capacitiva:

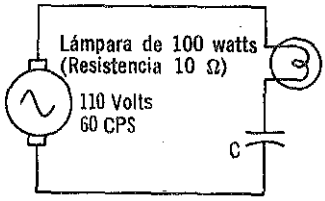
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

por lo tanto

$$f = \frac{1}{2\pi CX_C} = \frac{1}{6.28 \times 0.00002 \times 150} = 53 \text{ cps}$$

problemas resueltos (cont.)

Problema 16. ¿Qué capacitancia debe tener el capacitor si la lámpara debe disipar la potencia nominal en watts (wattaje)?



Para resolver este problema será conveniente cambiar las ecuaciones básicas, a formas nuevas.

Puesto que se conoce la capacidad nominal de potencia de la lámpara y su resistencia, en primer lugar debe determinarse la corriente que hará que la lámpara disipe su potencia nominal. Se comienza por la ecuación que relaciona la potencia (P), la corriente (I), y la resistencia (R), o $P = I^2R$. Esta ecuación puede cambiar a una forma que permita resolver la corriente, de la manera siguiente:

$$P = I^2R \quad \text{o} \quad I^2 = P/R, \text{ que se convierte en } I = \sqrt{P/R}$$

Puede calcularse la corriente que requiere la lámpara:

$$I = \sqrt{P/R} = \sqrt{100/10} = \sqrt{10} = 3.16 \text{ amperes}$$

Es un circuito en serie, de manera que deben fluir 3.16 amperes en toda su longitud. Con la tensión aplicada de 110 volts, la impedancia de circuito que hará posible el paso de 3.16 amperes se puede encontrar con la ley de Ohm, en la forma:

$$Z = E_{AP}/I = 110 \text{ volts}/3.16 \text{ amperes} = 34.8 \text{ ohms}$$

Por lo tanto la impedancia del circuito, que es la suma vectorial de la resistencia de la lámpara y la reactancia del capacitor, debe ser de 34.8 ohms. Se conoce el valor de la resistencia de la lámpara (R) y la impedancia del circuito (Z). A fin de determinar la reactancia capacitiva (X_C), se puede cambiar la ecuación para impedancia, $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \text{ que se convierte en } Z^2 = R^2 + X_C^2$$

Despejando a X_C^2, $X_C^2 = Z^2 - R^2$ que se convierte en $X_C = \sqrt{Z^2 - R^2}$ por lo tanto, $X_C = \sqrt{(34.8)^2 - (10)^2} = \sqrt{1,411} = 37.6$ ohms

En consecuencia, en el capacitor debe haber una reactancia capacitiva de 37.6 ohms. Para obtener el valor de la capacitancia cuya reactancia sea de 37.6 ohms con una tensión de 60 cps aplicada, se comienza por la ecuación básica que determina la reactancia capacitiva y se cambia como sigue:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{o} \quad 2\pi fCX_C = 1$$

Resolviendo C:

$$C = \frac{1}{2\pi fX_C}$$

Por lo tanto,

$$C = \frac{1}{6.28 \times 60 \times 37.6} = \frac{1}{14,160} = 70 \text{ microfarads}$$

resumen

☐ Puesto que en un circuito en serie RC la corriente del circuito fluye a través tanto de la resistencia como de la capacitancia, se usa dicha corriente como referencia de fase. ☐ La caída de tensión en la resistencia está en fase con la corriente, en tanto que la caída de tensión en la capacitancia está atrasada 90 grados con respecto a la corriente. ☐ La caída de tensión en la resistencia se puede encontrar mediante la expresión $E_R = IR$. ☐ La caída de tensión en la capacitancia se puede determinar mediante $E_C = IX_C$.

☐ La suma vectorial de las caídas de tensión en un circuito en serie RC es igual a la tensión aplicada: $E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$. ☐ El ángulo de fase se puede obtener a partir de $\tan \theta = E_C/E_R$; ó $\tan \theta = X_C/R$; ó $\cos \theta = E_R/E_{AP}$; ó $\cos \theta = R/Z$. ☐ La ecuación para calcular la impedancia en un circuito en serie RC es $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$. ☐ La corriente es igual en todo el circuito y se determina por: $I = E_{AP}/Z$.

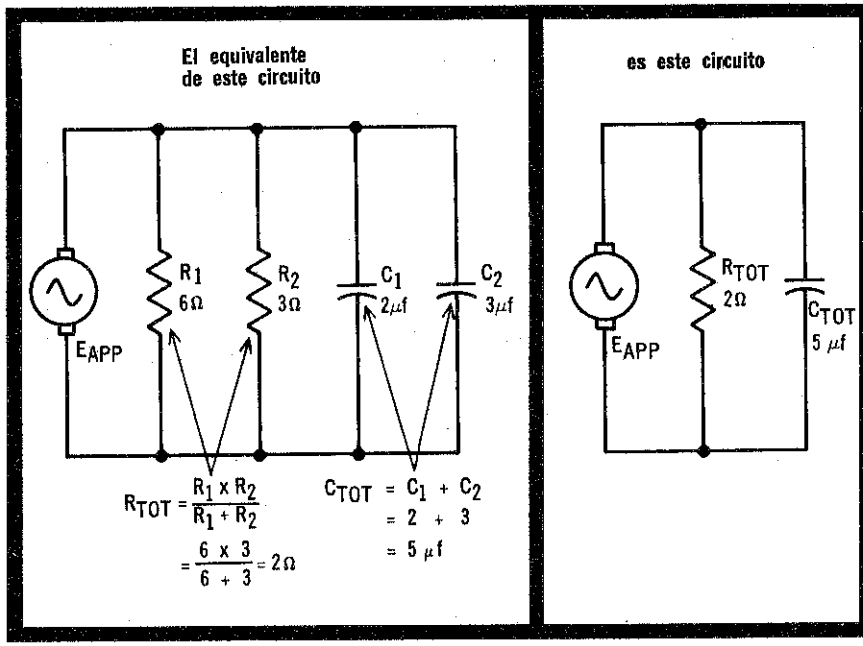
☐ Las ecuaciones de potencia para resolver un circuito en serie RC son similares a las de circuitos en serie RL. ☐ Puesto que la reactancia capacitiva X_C disminuye cuando la frecuencia aumenta, al aumentar ésta, un circuito en serie RC se vuelve más resistivo.

preguntas de repaso

1. En un diagrama vectorial de tensiones de un circuito en serie RC, ¿qué parte del circuito se toma como vector de referencia? ¿Por qué?
2. ¿Cuál es la regla de 10 a 1 para calcular la resistencia y la reactancia capacitiva en un circuito en serie RC?
3. ¿Qué significa *corriente de fuga*? ¿Qué efecto tiene la corriente de fuga en la relación de fase que hay entre la tensión y la corriente de un capacitor?
4. ¿Cuál es la resistencia en un circuito en serie RC cuando la impedancia es de 130 ohms, y la reactancia capacitiva de 50 ohms?
5. ¿Cuál es el ángulo de fase para el circuito de la pregunta 4?
6. La tensión aplicada a un circuito en serie RC es de 100 volts, la cual produce una corriente de 5 amperes. ¿Cuál es la magnitud de la impedancia del circuito?
7. La potencia disipada en un circuito es 500 watts, la impedancia es 10 ohms, y el ángulo de fase es 60 grados. ¿Cuál es el valor de la corriente en el circuito?
8. ¿Cuál es el valor de la potencia aparente de un circuito que disipa 500 watts, y cuyo factor de potencia es 0.25?
9. ¿Entre cuáles valores se puede encontrar el factor de potencia de un circuito en serie RC? ¿Por qué?
10. ¿Cuál es la tensión en un capacitor de un circuito en serie RC cuando la tensión aplicada es 100 volts, y la tensión en el resistor es de 80 volts?

circuitos en paralelo RC

En un circuito en paralelo RC, una o más cargas resistivas y una o más cargas capacitivas, se conectan en paralelo a una fuente de tensión. Por lo tanto, se tienen *ramas resistivas,* que sólo tienen resistencia; y *ramas capacitivas,* que sólo tienen capacitancia. La corriente que sale de la fuente de tensión se divide entre las ramas, de manera que se tienen diferentes corrientes en diferentes ramas. Por lo tanto, la corriente no es una cantidad común, como lo es en el circuito en serie RC.



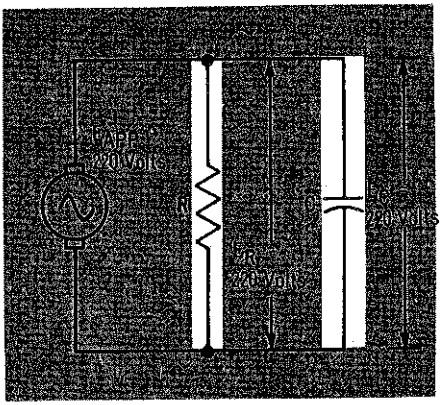
Cuando se calculan las magnitudes totales del circuito correspondientes al voltaje aplicado, corriente de línea, impedancia y potencia, las ramas resistivas y capacitivas deben reducirse primeramente a sus equivalentes más simples

La descripción de circuitos en paralelo RC que aparece en las siguientes páginas abarcará circuitos en paralelo que tienen una sola rama resistiva y una sola rama capacitiva. Los circuitos que tienen más de una rama resistiva o más de una capacitiva son idénticos, excepto que, al resolver magnitudes generales del circuito, por ejemplo impedancia o corriente de línea, primero deben reducirse las ramas, resistiva o capacitiva a una rama única equivalente, resistiva o capacitiva.

tensión

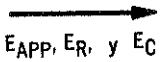
En un circuito en paralelo RC, como en cualquier circuito en paralelo, la tensión aplicada llega *directamente* a cada rama. Por lo tanto, las tensiones de rama son iguales entre sí, así como con la tensión aplicada; y las tres están *en fase*. De manera que si se conoce cualquiera de las tensiones del circuito, se conocerán todas las demás, puesto que la tensión es *común* en todo el circuito, sirve como cantidad común en cualquier representación vectorial de circuitos en paralelo RC. Esto significa que, en cualquier diagrama vectorial, el vector de referencia tendrá la misma dirección, o relación de fase, que la tensión del circuito. La resistencia de circuito y la corriente a través de esa resistencia son las dos magnitudes que tienen esta relación con la tensión del circuito, y cuyos vectores, por lo tanto, tienen dirección de cero grados.

En un circuito en paralelo RC, cada voltaje de rama es igual al voltaje aplicado



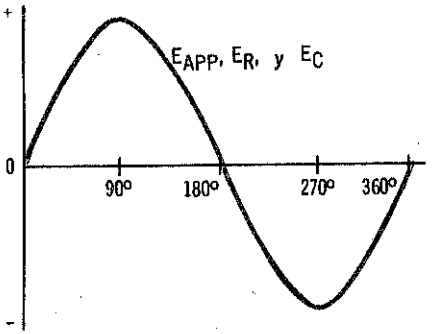
Las relaciones de fase entre las varias magnitudes en un circuito en paralelo RC se expresan en relación a la forma en que sus fases difieren del voltaje del circuito. Esto se debe a que el voltaje es igual en todo el circuito, lo que proporciona una base para expresar diferencias de fase

Como vector



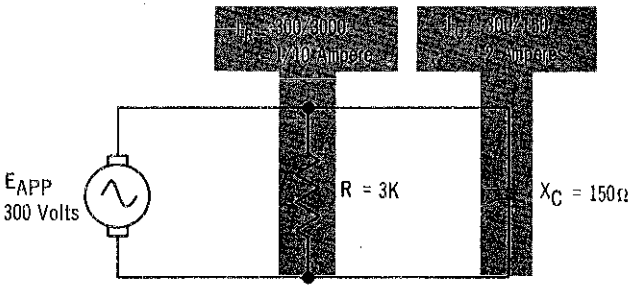
E_{APP}, E_R, y E_C

Como forma de onda



corriente de rama

La corriente en cada rama de un circuito en paralelo RC es *independiente* de la corriente en las demás ramas. La corriente en una rama depende sólo de la tensión en la rama y la *resistencia* o reactancia capa-



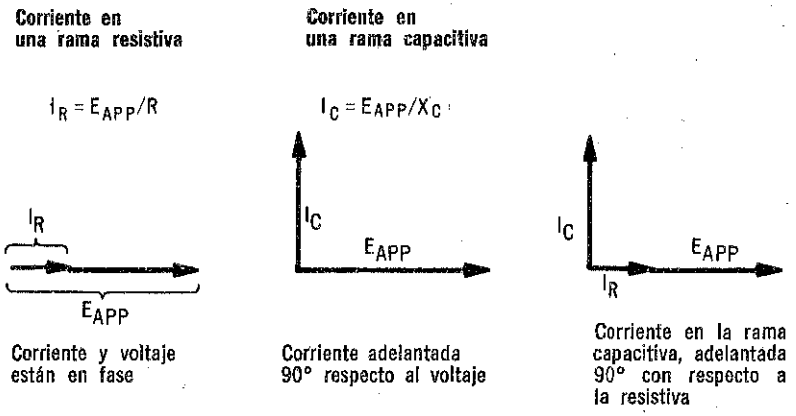
citiva que exista en ella. La corriente en la rama resistiva se calcula así: por la ecuación:

$$I_R = E_{AP}/R$$

La corriente en la rama capacitiva se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

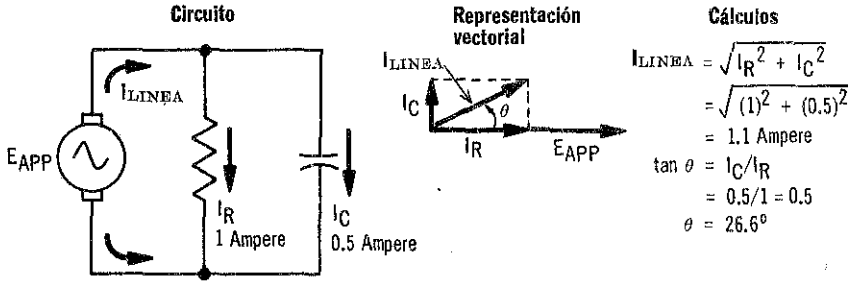
$$I_C = E_{AP}/X_C$$

La corriente en la rama resistiva está en fase con la tensión de la rama, en tanto que la corriente en la rama capacitiva está adelantada 90°, con



respecto a la tensión en la rama. Puesto que ambas tensiones en las ramas son iguales, la corriente en la rama *capacitiva* (I_C) debe estar *adelantada* 90° con respecto a la corriente en la rama *resistiva* (I_R).

La corriente de línea en un circuito RC en paralelo es igual a la SUMA VECTORIAL de la corriente que hay en la rama resistiva más la que fluye en la rama capacitiva



corriente de línea

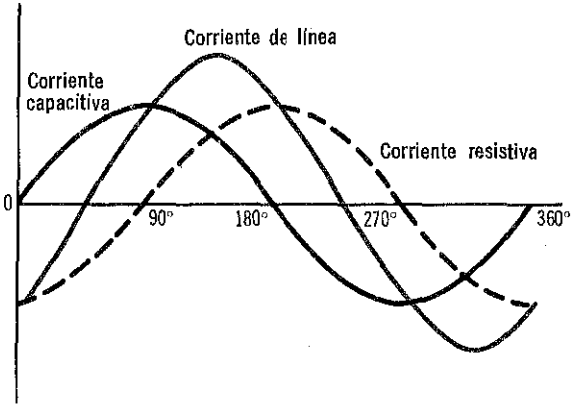
Puesto que las corrientes en las ramas de un circuito en paralelo RC están defasadas entre sí, deben sumarse *vectorialmente* para determinar la corriente en la línea. Ambas ramas están defasadas 90° entre sí, de manera que sus vectores forman un triángulo rectángulo, cuya hipotenusa es la corriente de la línea. La ecuación para calcular la corriente de la línea, I_{LINEA}, es

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

Si se conocen la impedancia del circuito y la tensión aplicada puede también calcularse la corriente en la línea a partir de la ley de Ohm:

$$I_{LINEA} = E/Z$$

La corriente en la línea es la suma vectorial de las corrientes resistiva y capacitiva

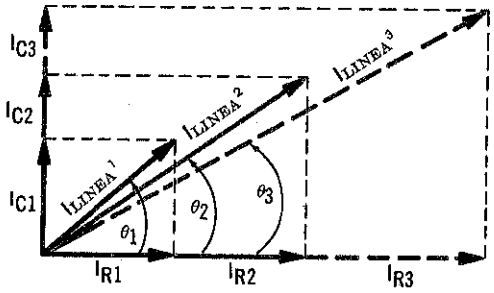


La corriente capacitiva está adelantada 90° con respecto a la resistiva

corriente de línea (cont.)

Puesto que la corriente en la rama resistiva de un circuito en paralelo RC está en fase con la tensión aplicada, en tanto que la corriente en la rama capacitiva está adelantada 90° con respecto a la tensión aplicada, la suma de ambas corrientes de rama, o sea la corriente de línea, estará adelantada con respecto a la tensión aplicada por un ángulo de fase inferior a 90° pero mayor que 0°. El ángulo exacto depende de si la corriente capacitiva es mayor o menor que la resistiva. Si la corriente capacitiva es mayor, el ángulo se aproximará a los 90°, en tanto que si es mayor la corriente resistiva, el ángulo se aproximará a 0°. En casos en que una de las corrientes sea10 o más veces mayor que la otra, se puede

La corriente de línea en un circuito paralelo RC tendrá un ángulo de fase que se encuentra entre 0 y 90°, adelantado. El valor de θ depende de los valores relativos de las corrientes capacitivas y resistivas en las ramas



considerar que la corriente de la línea tiene un ángulo de fase de cero grados si la corriente resistiva es mayor o de 90° si la coriente capacitiva es mayor. El valor del ángulo de fase se puede calcular a partir de los valores de las dos corrientes en las ramas, mediante la ecuación:

$$\tan \theta = I_C/I_R$$

Substituyendo las cantidades $I_C = E/X_C$ e $I_R = E/R$ en la ecuación anterior, se pueden derivar otras dos ecuaciones útiles para calcular el ángulo de fase θ. Estas son las siguientes:

$$\tan \theta = R/X_C \qquad \cos \theta = Z/R$$

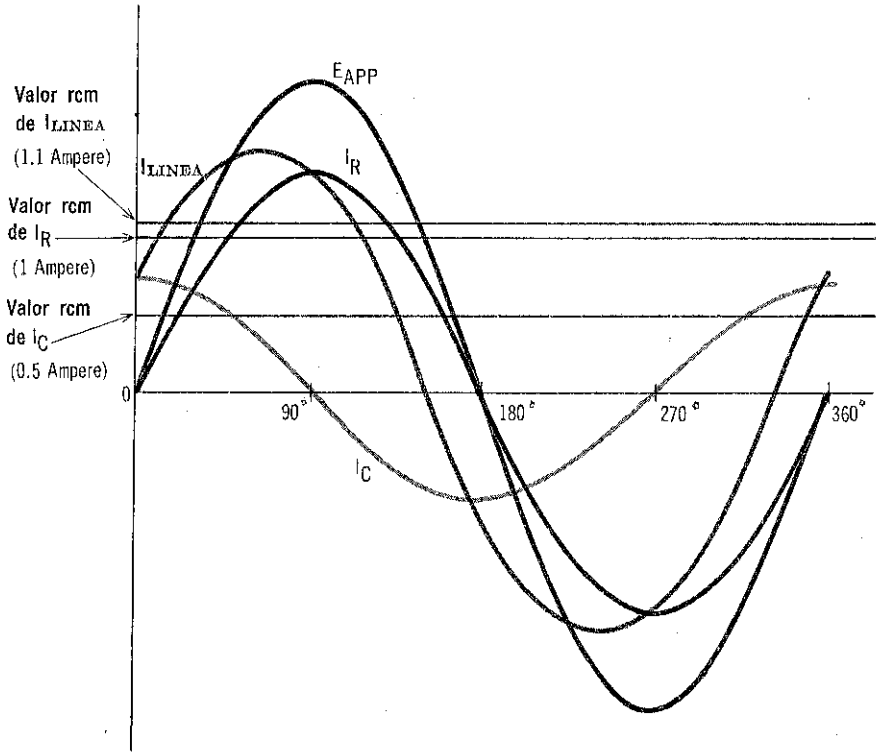
Una vez conocidas la corriente de la línea y la tensión aplicada a un circuito en paralelo RC, se puede determinar la potencia del circuito mediante las mismas ecuaciones que se han estudiado para circuitos en paralelo RL. Son las siguientes:

$$P_{APARENTE} = E_{AP}I_{LINEA}$$
$$P_{REAL} = E_{APARENTE}I_{LINEA} \cos \theta$$

donde $\cos \theta$ es el factor de potencia.

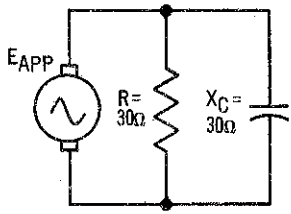
ondas de corriente

Las corrientes en las ramas de un circuito en paralelo RC están defasadas entre sí; su *suma vectorial* y no su suma aritmética proporcionará la corriente de la línea. Esta es la misma condición que existe para las caídas de tensión en un circuito en serie RC. Al sumar vectorialmente las corrientes, se suman sus valores *instantáneos* en cada punto y luego se determina el valor medio o efectivo de la corriente resultante. Esto se puede apreciar en las ondas de corriente mostradas. Estas son las ondas correspondientes al circuito que se ha resuelto en la página 4-69.



Todo punto en la forma de onda de corriente de línea (I_{LINEA}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las ondas I_R e I_C. El valor rcm de las ondas de corriente de línea se muestra en consecuencia, igual a la suma vectorial de los valores rcm de las ondas I_R e I_C

En un circuito en paralelo RC



$$Z = \frac{R \times X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

$$= \frac{30 \times 30}{\sqrt{(30)^2 + (30)^2}} = \frac{900}{42.4}$$

$$= 21 \text{ Ohms}$$

Cuando la resistencia y la reactancia capacitiva son iguales, la impedancia no es de la mitad del valor de uno de ellos o 15 ohms, como podría suponerse con base en el conocimiento de resistencias en paralelo

impedancia

La impedancia de un circuito en paralelo RC representa la oposición total al flujo de corriente que ofrece la resistencia de la rama resistiva y la reactancia capacitiva de la rama correspondiente. Como la impedancia de un circuito en paralelo RL, se puede calcular por medio de una ecuación similar a la que sirve para determinar la resistencia total de dos resistencias en paralelo. Sin embargo, igual que en el caso de circuitos en paralelo RL, dos cantidades vectoriales no se pueden sumar *directamente*; la *suma vectorial* deberá usarse en su lugar. Por lo tanto, la ecuación para calcular la impedancia de un circuito en paralelo RC es la siguiente:

$$Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

donde $\sqrt{R^2 + X_C^2}$ es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia capacitiva.

En casos en que se conoce la tensión aplicada y la corriente de línea del circuito, se puede determinar la impedancia simplemente mediante la ley de Ohm, en la forma siguiente:

$$Z = E_{AP}/I_{LINEA}$$

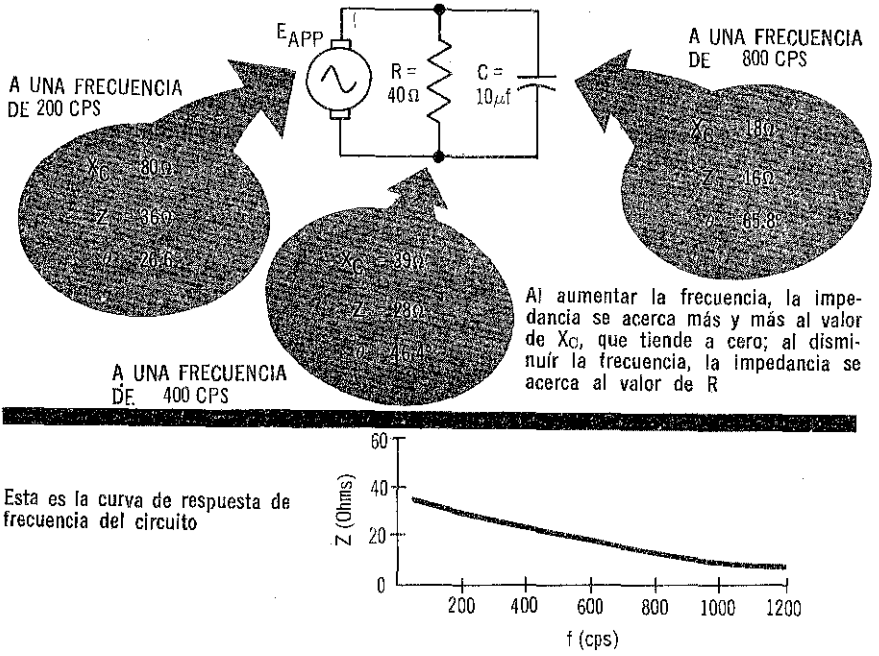
La impedancia de un circuito en paralelo RC siempre es *menor* que la resistencia o la reactancia capacitiva de cada una de las ramas.

Los valores relativos de X_C y R determinan cuán capacitiva o resistiva es la corriente de línea del circuito. La *menor*, y, por lo tanto, que permita el flujo de *mayor* corriente en la rama, es el factor determinante. Por lo tanto, si X_C es menor que R, la corriente en la rama capacitiva es mayor que la corriente en la rama resistiva y la corriente en la línea tiende a ser más capacitiva. Lo opuesto es cierto si R es menor que X_C. De X_C o R, si una de ellas es 10 o más veces mayor que la otra, el circuito funcionará, desde el punto de vista práctico, como si la rama con la mayor de las dos magnitudes no existiera.

efecto de la frecuencia

Como en todos los circuitos RL y RC, la frecuencia de la tensión aplicada determina muchas de las características de un circuito en paralelo RC. La frecuencia afecta al valor de la reactancia capacitiva y, por lo tanto, también a la impedancia del circuito, la corriente en la línea y al ángulo de fase, ya que, hasta cierto punto, están determinados por el valor de X_C. Mientras más alta sea la frecuencia de un circuito en paralelo RC, más bajo será el valor de X_C. Esto significa que, para un valor dado de R, la impedancia también es menor haciendo que la corriente de la línea sea

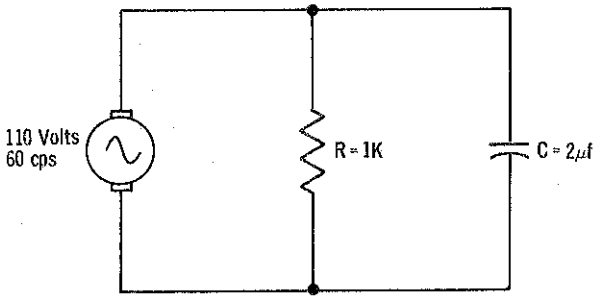
Las características de un circuito en paralelo RC varían con las diferentes frecuencias



Esta es la curva de respuesta de frecuencia del circuito

mayor y más capacitiva. Recíprocamente, cuanto menor sea la frecuencia, mayor será el valor de X_C, mayor la impedancia y menor y más resistiva la corriente en la línea. Por lo tanto, el mismo circuito puede tener una corriente de línea *pequeña, resistiva,* a *bajas frecuencias,* y una corriente de línea *grande, capacitiva,* a *altas frecuencias.* Además, puesto que según la regla de 10 a 1 se puede hacer caso omiso de la rama que tiene la corriente menor cuando una de ellas es 10 o más veces mayor que la otra; un circuito en paralelo RC puede funcionar como un circuito en *serie simple,* resistivo o capacitivo, dependiendo de la frecuencia.

problemas resueltos



Problema 17. En el circuito, determinar la impedancia, las corrientes de rama, la corriente de línea, el ángulo de fase (θ), y la potencia real.

Un análisis del diagrama del circuito muestra que se deben resolver todas las magnitudes desconocidas, con excepción de la reactancia capacitiva X_C y la potencia aparente. Sin embargo, para encontrar la impedancia, es necesario conocer X_C, de manera que también ésta debe calcularse.

Cálculo de X_C:

$$X_C \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 60 \times 0.000002} = \frac{1}{0.000754} = 1{,}326 \text{ ohms}$$

Cálculo de Z:

$$Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{1{,}000 \times 1{,}326}{\sqrt{(1{,}000)^2 + 1{,}326)^2}} = \frac{1.326{,}000}{1{,}661} = 798 \text{ ohms}$$

Cálculo de las corrientes de rama: Aquí se aprecia que para determinar la corriente de línea, el ángulo de fase y la potencia real, no es necesario que se calculen las corrientes de rama, ya que se conoce la tensión aplicada y la impedancia y, en consecuencia, se puede aplicar la ley de Ohm. Las corrientes de rama se calculan sólo porque se han pedido.

$$I_R = E/R = 110 \text{ volts}/1{,}000 \text{ ohms} = 0.11 \text{ ampere}$$
$$I_C = E/X_C = 110 \text{ volts}/1{,}326 \text{ ohms} = 0.083 \text{ ampere}$$

Cálculo de I_{LINEA}:

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{(0.11)^2 + (0.083)^2} = \sqrt{0.019} = 0.14 \text{ ampere}$$

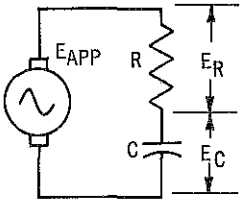
Cálculo de θ:

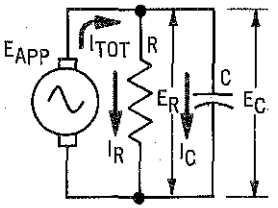
$$\tan \theta = R/X_C = 1{,}000/1{,}326 = 0.754 \qquad \theta = 37°$$

Cálculo de la potencia real:

$$P_{REAL} = EI_{LINEA} \cos \theta$$
$$= 110 \times 0.14 \times 0.798 = 12.3 \text{ watts}$$

comparación de circuitos RC en serie y en paralelo





	Circuito en serie RC	Circuito en paralelo RC
Corriente	Es la misma en todas las partes del circuito. Por lo tanto, las corrientes en R y C están en fase.	Se divide entre las ramas resistiva y capacitiva. $I_{TOT} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$ $I_R = E_{AP}/R$ $I_C = E_{AP}/X_C$ La corriente en C está adelantada en 90° respecto a la corriente en R.
Tensión	La suma vectorial de las caídas de tensión en R y C es igual a la tensión aplicada. $E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$ La tensión en C está atrasada 90° con respecto a la tensión en R.	La tensión en cada rama es la misma que la tensión aplicada. Por lo tanto, las tensiones en R y C están en fase. $E_R = E_C = E_{AP}$
Impedancia	Es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia capacitiva. $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	Se calcula igual que las resistencias en paralelo, excepto porque se utiliza la suma vectorial. $Z = RX_C/\sqrt{R^2 + X_C^2}$
Angulo de fase (θ)	Es el ángulo entre la corriente del circuito y la tensión aplicada. $\tan\theta = E_C/E_R = X_C/R$ $\cos\theta = R/Z$	Es el ángulo entre la corriente en la línea y la tensión aplicada. $\tan\theta = I_C/I_R = R/X_C$ $\cos\theta = Z/R$
Potencia	La potencia transmitida por la fuente es potencia aparente. La potencia consumida efectivamente en el circuito, es potencia real. El factor de potencia determina la porción de la potencia aparente que es potencia real. $P_{APARENTE} = E_{AP}I$ $P_{REAL} = E_{AP}I\cos\theta$ P. F. $= \cos\theta$	
Efecto del aumento de frecuencia	X_C disminuye, lo que a su vez hace que aumente la corriente de circuito. El ángulo de fase disminuye, lo que significa que el circuito es más resistivo.	X_C disminuye, la corriente de la rama capacitiva aumenta, de manera que la corriente en la línea también aumenta. El ángulo de fase aumenta, por lo que el circuito es más capacitivo.
Efecto del aumento de la resistencia	El ángulo de fase disminuye, lo que significa que el circuito es más resistivo.	El ángulo de fase aumenta, lo que significa que el circuito es más capacitivo.
Efecto del aumento de capacitancia	El ángulo de fase disminuye, lo que significa que el circuito es más resistivo.	El ángulo de fase aumenta, lo que significa que el circuito es más capacitivo.

resumen

☐ En un circuito en paralelo RC, la tensión aplicada es la misma en todas las ramas. Por lo tanto, se usa como referencia de fase. ☐ La corriente en cada rama de un circuito en paralelo RC es independiente de la corriente en las demás ramas. ☐ La corriente en la rama resistiva se obtiene según $I_R = E_{AP}/R$. ☐ La corriente en la rama capacitiva se determina a partir de $I_C = E_{AP}/X_C$. ☐ La corriente de la línea se obtiene sumando vectorialmente las corrientes en las ramas. $I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$. También se puede determinar mediante la ley de Ohm para circuitos de c-a $I = E/Z$.

☐ El ángulo de fase de un circuito en paralelo RC se obtiene por $\tan \theta = I_C/I_R$; o $\tan \theta = R/X_C$; o $\cos \theta = Z/R$. ☐ La impedancia se determina sumando vectorialmente las oposiciones en paralelo. La ecuación que determina la impedancia es: $Z = RX_C/(\sqrt{R^2 + X_C^2})$.

☐ Las ecuaciones de la potencia para un circuito en paralelo RC son idénticas a las de los circuitos en serie RC. ☐ La reactancia capacitiva X_C disminuye al aumentar la frecuencia, por lo que al aumentar la frecuencia, el circuito en paralelo RC tiende a comportarse como un circuito exclusivamente capacitivo.

preguntas de repaso

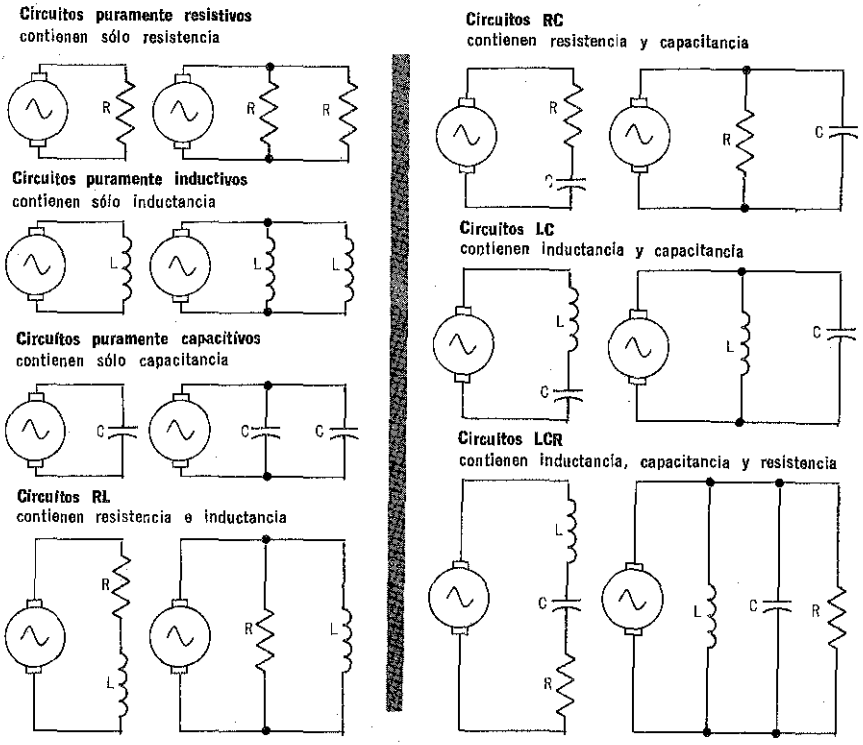
1. ¿Qué significa el término *corriente de línea* en un circuito en paralelo RC?

Para las preguntas 2 a 10, suponga un circuito en paralelo RC al que se aplica una tensión de 100 volts, un resistor con una resistencia de 20 ohms, y un capacitor con una reactancia capacitiva de 10 ohms.

2. ¿Cuál es la corriente en el resistor? ¿Cuál es en el capacitor?
3. ¿Cuál es la tensión en el resistor? ¿Cuál es en el capacitor?
4. ¿Cuál es la impedancia del circuito?
5. ¿Cuál es el ángulo de fase en el circuito?
6. ¿Cuál es la potencia aparente? ¿Cuál es la potencia real? ¿Cuál es el factor de potencia?
7. ¿Cuál es el valor de la corriente de línea?
8. ¿Cuánto tiene que multiplicarse la frecuencia para que el circuito en paralelo se convierta efectivamente en un circuito capacitivo?
9. Responda las preguntas 3 a 5 para el caso en que la frecuencia se duplique.
10. Responda las preguntas 5 a 7 para el caso en que la frecuencia se triplique.

circuitos LCR

Se han establecido ya las propiedades fundamentales de los circuitos resistivos, inductivos y capacitivos, así como los circuitos que tienen resistencia e inductancia y los que tienen resistencia y capacitancia. Ahora se estudiarán circuitos que tienen las tres propiedades básicas de inductancia (L) capacitancia (C) y resistencia (R). A estos circuitos se les llama *circuitos LCR* y pueden consistir en combinaciones de inductancia, capacitancia y resistencia, ya sea en serie o en paralelo. Se observará que todo lo estudiado previamente con respecto a circuitos resistivos, inductivos y capacitivos se aplica al análisis de los circuitos LCR. Además, se encontrarán algunas nuevas propiedades y características.

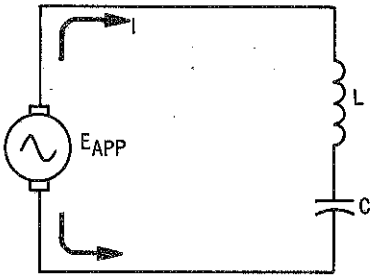


La descripción de circuitos LCR que se presenta en las páginas siguientes se divide en dos partes: una que trata sobre circuitos en serie, y la otra sobre circuitos en paralelo. Tanto para los tipos en serie como en paralelo, se estudian primero *circuitos LC* puros. Estos son circuitos que tienen inductancia y capacitancia, pero carecen de resistencia. Después de que se hayan descrito completamente los circuitos LC, se incluirá la resistencia y se analizarán circuitos prácticos LCR.

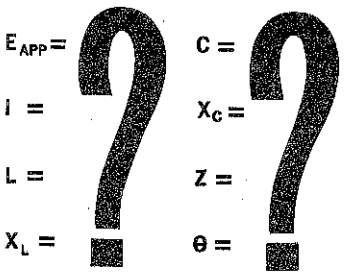
circuitos en serie LC

Un circuito en serie LC consta de una *inductancia* y una *capacitancia* conectadas en *serie* con una fuente de tensión. *No hay resistencia* en el circuito. Desde luego, esto es imposible en la práctica, ya que todo circuito tiene cierto grado de resistencia. Sin embargo, la resistencia del circuito correspondiente al alambrado, el devanado de la bobina y la fuente de tensión suele ser pequeña y, por lo tanto, tiene poco o ningún efecto en la operación del circuito.

Un circuito en serie LC

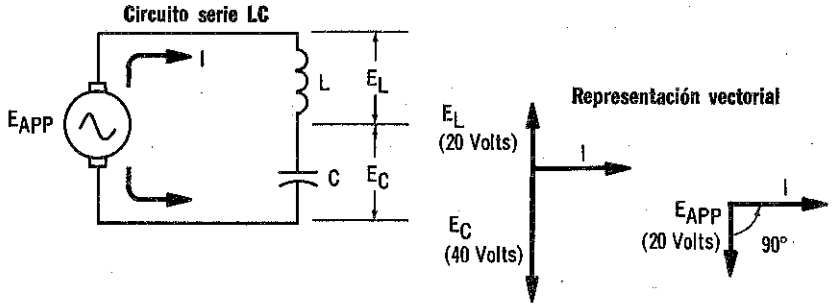


En un circuito en serie LC, la inductancia y la capacitancia están conectadas en serie de manera que la corriente total del circuito fluye a través de ambas. Puesto que la inductancia y la capacitancia están en serie, sus reactancias X_L y X_O también están en serie



Las magnitudes de circuitos en serie LC que, normalmente tienen interés son el voltaje, aplicado, E_{APP}; La corriente I; la inductancia L; la reactancia inductiva X_L; la capacitancia C; la reactancia capacitiva X_C; la impedancia Z y el ángulo de fase *θ*

Como en todos los circuitos en serie, la *corriente* en un circuito serie LC es la *misma* en todos los puntos. De manera que la corriente en la inductancia es la misma y, por lo tanto, está en fase con la corriente en la capacitancia. Debido a ello, en cualquier diagrama vectorial de un circuito en serie LC, la dirección del *vector de corriente* es la *dirección de referencia* de 0°. Todas las demás magnitudes, tales como la tensión aplicada y las caídas de tensión en el circuito, se expresan sobre la base de su relación de fase con respecto a la corriente del circuito. También, como en el caso de los circuitos RL y RC, se selecciona la corriente como referencia de fase, por conveniencia; no porque el ángulo de fase de la corriente sea fijo y no cambie. El ángulo de fase de la corriente depende de las propiedades del circuito, de manera que efectivamente cambia. Lo importante es la *diferencia de fase* entre la corriente y la tensión aplicada; vectorialmente esto es lo mismo, independientemente de que se use la corriente o la tensión como referencia de fase.



El voltaje aplicado es igual a la suma vectorial de la caída de voltaje en la inductancia (E_L) y la caída en la capacitancia (E_C). Si E_L es mayor que E_C, la corriente es puramente inductiva, de manera que el voltaje aplicado está adelantado con respecto a la corriente por 90°; y si E_C es mayor que E_L, la corriente es puramente capacitiva de manera que el voltaje aplicado está atrasado 90° con respecto a la corriente

tensión

Cuando fluye corriente alterna en un circuito en serie LC, las caídas de tensión en la inductancia y la capacitancia dependen de la corriente del circuito y de los valores de X_L y X_C. Las tensiones se determinan de la siguiente manera:

$$E_L = IX_L \qquad y \qquad E_C = IX_C$$

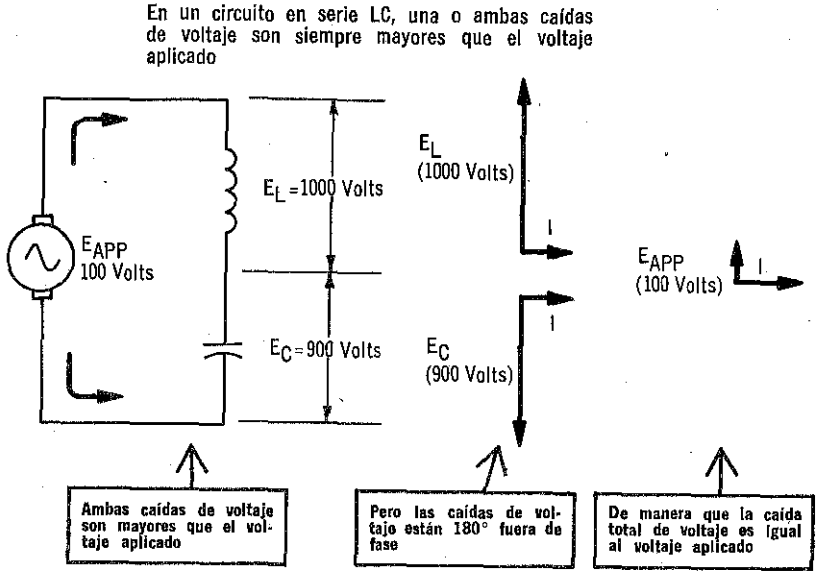
La tensión en la *inductancia está adelantada* 90° con respecto a la corriente, en tanto que la tensión en la *capacitancia, está atrasada* 90° con respecto a la corriente. Puesto que la *corriente* en ambos es la *misma,* la tensión en la *inductancia* estará adelantada 180° con respecto a la de la *capacitancia.* Téngase presente que, debido a las diferencias de fase, en un circuito en serie RL o RC la *suma vectorial* de las caídas de tensión es igual a la tensión aplicada. Esto también ocurre en un circuito en serie LC. Sin embargo, se observa una diferencia, por la forma en que se usa la suma vectorial en circuitos LC.

En circuitos RL y RC, los vectores de tensión están defasados 90° entre sí, de manera que se utiliza el teorema de Pitágoras para sumarlos. Sin embargo, el método usado para sumar vectores que difieren 180°, según se recordará consiste en restar el vector más pequeño del mayor y asignar a la resultante la dirección del mayor. Aplicado a circuitos en serie LC, esto significa que la tensión aplicada es igual a la *diferencia* entre las caídas de tensión en la inductancia y la capacitancia, cuando el *ángulo de fase* entre la tensión aplicada y la corriente del circuito, determinado por la *mayor* de las caídas de tensión. Por ejemplo, suponga que la caída de tensión en la inductancia fuese de 50 volts y en la capacitancia, de 40 volts. La tensión aplicada sería de 10 volts (50 − 40) y estaría adelantada 90° respecto a la corriente, ya que la mayor caída de tensión se presenta en la inductancia.

tensión (cont.)

Una propiedad única de los circuitos en serie LC es que una de las caídas de tensión, ya sea E_L o E_C, siempre es *mayor* que la *tensión aplicada.* Además, en algunos casos, ambas caídas de tensión son mayores que la tensión aplicada. Según se confirmará más tarde, esto se debe a que las reactancias de la inductancia y la capacitancia tienen un *papel doble* en el circuito. *Juntas* se oponen a la corriente del circuito, en tanto que, independientemente, producen sus caídas de tensión.

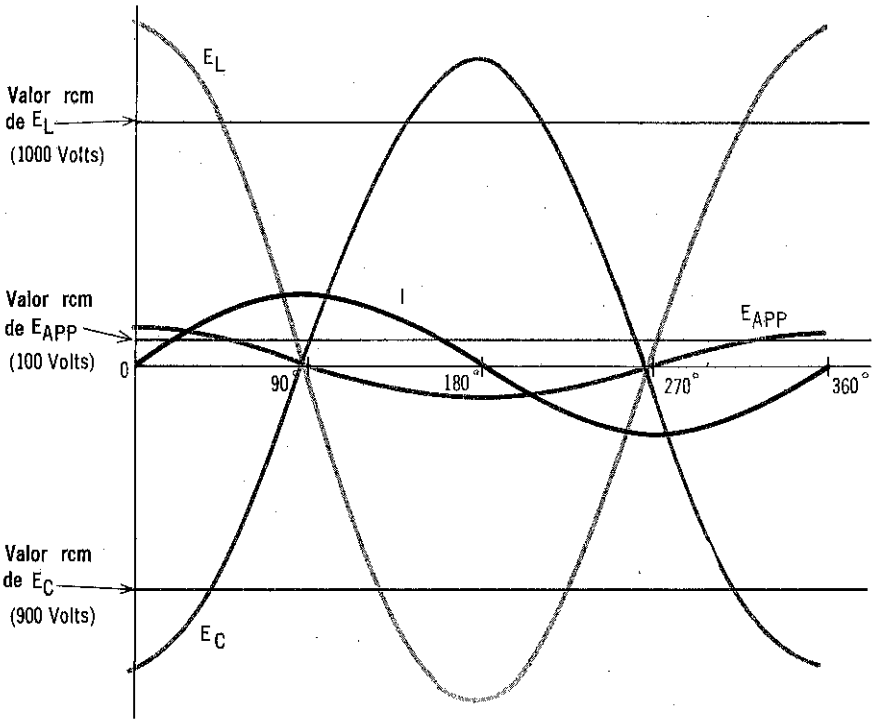
En el primer caso, su relación de fase es tal que tienden a anularse recíprocamente. Por lo tanto, la oposición total que ofrecen a la corriente es menor de la que ofrecería una sola de ellas, de manera que se tiene un flujo de corriente mayor que el que una de ellas permitiría por sí misma. Sin embargo, cuando fluye esta corriente ocasiona una caída de tensión cuyo valor es el total correspondiente a cada reactancia particular. En efecto, la fuente de tensión "ve" un circuito con poca oposición al flujo de corriente de manera que transmite una corriente relativamente elevada. Pero al fluir en el circuito, la corriente encuentra una oposición que la fuente no "ve".



Un punto importante que debe recordarse es que, aunque una o ambas caídas de tensión es mayor que la tensión aplicada, están defasadas 180 *grados entre sí.* Una de ellas efectivamente anula parte de la otra, de manera que la caída total de tensión siempre es igual a la tensión aplicada.

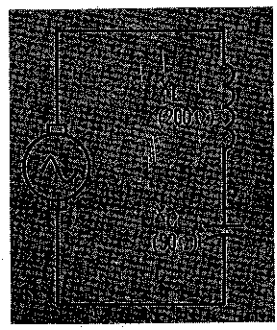
ondas de tensión

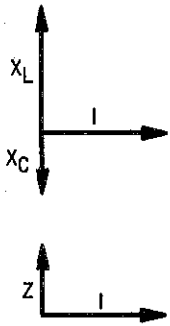
En la página anterior se ha estudiado un circuito con caídas de tensión particulares de 1,000 volts y 900 volts; sin embargo, la fuente de tensión sólo era de 100 volts. La razón era que las caídas de tensión estaban defasadas 180° entre sí. Debido a su diferencia de fase, las dos caídas de tensión tenían que sumarse vectorialmente. Y, puesto que su diferencia de fase era tal que, en efecto, una tensión *anulaba* una parte de la otra, se efectuó la suma de vectores y se obtuvo por *adición algebraica*. Así, pues, una tensión se consideró positiva y la otra negativa; las dos cantidades se sumaron algebraicamente. Como se muestra, las ondas de las dos caídas de tensión también se pueden sumar algebraicamente y el valor medio o el efectivo de la onda resultante es, respectivamente, el valor medio o el efectivo de la tensión aplicada.



Todo punto de la forma de onda de voltaje aplicado (E_{APP}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las formas de onda E_L y E_C

Circuito | Representación vectorial | Cálculos





$Z = X_L - X_C$

$= 200 - 90$

$= 110$ Ohms, inductivo

impedancia

Se recordará de lo estudiado de los circuitos en serie RL y RC que era conveniente considerar resistencia, reactancia inductiva y reactancia capacitiva como magnitudes vectoriales debido a las relaciones de fase existentes entre las caídas de tensión que originan y la corriente del circuito. Entonces, la dirección de estas magnitudes vectoriales era igual a la dirección de sus respectivas caídas de tensión. Como resultado, el vector de impedancia tendría la misma dirección que la tensión aplicada. Estas mismas técnicas se usan para determinar la impedancia de circuitos en serie LC.

La reactancia inductiva, como la tensión en la inductancia (E_L), está adelantada 90° con respecto a la corriente del circuito (que es la referencia de 0°) y la reactancia capacitiva, como la tensión en la capacitancia (E_C), está atrasada 90° con respecto a la corriente. Puesto que la corriente es la misma en ambas, la reactancia inductiva está defasada 180° respecto a la reactancia capacitiva. Por tanto, la impedancia es la suma vectorial de las dos reactancias. Las reactancias difieren en 180°, de manera que su suma vectorial se encuentra restando la menor de la mayor. Si la reactancia inductiva es mayor, la ecuación para calcular la impedancia es $Z = X_L - X_C$. Y si la reactancia capacitiva es mayor, la ecuación es $Z = X_C - X_L$.

A diferencia de los circuitos RL y RC, en los cuales la impedancia era una combinación de resistencia y reactancia, la impedancia en un circuito LC es exclusivamente inductiva o bien exclusivamente capacitiva. Es exclusivamente inductiva si X_L es la reactancia mayor y exclusivamente capacitiva si X_C es mayor. Generalmente, el tipo de impedancia se especifica inmediatamente después del valor de la misma. Por ejemplo, se dice una impedancia de 50 ohms capacitiva; o 10 ohms inductiva. Si la impedancia es capacitiva, la corriente es exclusivamente capacitiva; y si la impedancia es inductiva, la corriente es meramente inductiva.

corriente

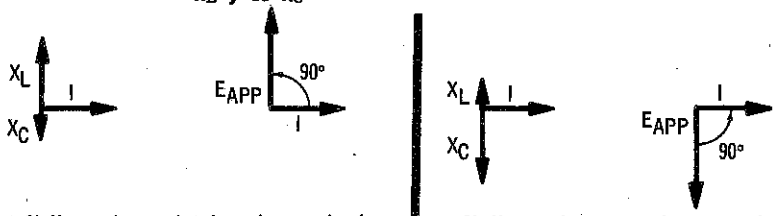
En un circuito en serie LC fluye la misma corriente a través tanto de la inductancia como de la capacitancia. Si la reactancia *inductiva* (X_L) es la *mayor* de las dos reactancias del circuito, la corriente es exclusivamente inductiva, y estará *atrasada* 90° con respecto a la tensión aplicada. Y si la reactancia *capacitiva* (X_C) es la *mayor*, la corriente es solamente capacitiva y estará *adelantada* 90° con respecto a la tensión aplicada. Por lo tanto, y por lo que respecta a la corriente y a la tensión aplicada, un circuito en serie LC es un circuito puramente inductivo o bien capacitivo de manera exclusiva: inductivo si la impedancia, que es la reactancia neta, es inductiva, y capacitivo si la impedancia es capacitiva. La magnitud de la corriente está relacionada con la tensión aplicada y con la impedancia, de acuerdo con la ley de Ohm aplicada a circuitos de c-a. De manera que, si se conocen la tensión aplicada y la impedancia se puede calcular la corriente de la ecuación:

$$I = E_{AP}/Z$$

Puede hacerse la siguiente pregunta: "¿Qué sucede si las dos reactancias son iguales?" Esto es enteramente posible y, de hecho, con frecuencia así ocurre. Si las dos reactancias fuesen iguales en un circuito

La magnitud de la corriente en circuitos en serie LC se determina según la Ley de Ohm

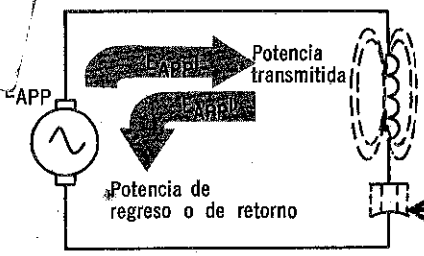
El ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado dependen de los valores relativos de X_L y de X_C



Si X_L es la reactancia más grande, la corriente está atrasada 90° con respecto al voltaje

Si X_C es la reactancia mayor la corriente estará adelantada 90° con respecto al voltaje.

LC puro, que se está considerando ahora, la impedancia sería *cero*. Por lo tanto, sin ninguna oposición, fluiría una corriente infinitamente grande. Naturalmente, esto nunca ocurre, ya que todo circuito tiene algo de resistencia. En los circuitos reales, cuando las dos reactancias son iguales, se tiene el paso de grandes corrientes y la magnitud de la corriente es limitada sólo por la resistencia del circuito. A esta condición se le llama *resonancia*, la cual se estudiará más adelante.



Potencia real en un circuito ideal LC, igual a cero

La potencia transmitida a la inductancia es almacenada en el campo magnético cuando el campo se está desarrollando y regresa a la fuente cuando desaparece

La potencia entregada a la capacitancia se almacena en el campo electrostático cuando el capacitor está cargando y regresa a la fuente cuando el capacitor descarga

Ninguna potencia transmitida al circuito por la fuente, se consume. Toda regresa a la fuente. La potencia real, que es la potencia consumida, es cero.

potencia

En un circuito en serie LC, la fuente transmite tanto a la inductancia como a la capacitancia. La energía representada por la potencia que se transmite a la inductancia es *almacenada* en el *cámpo magnético* que rodea la inductancia y la que se transmite a la capacitancia es *almacenada* en el *campo electrostático* entre las placas del capacitor. Puesto que teóricamente no hay resistencia en el circuito, toda la energía almacenada *regresa* a la fuente cada vez que el *campo magnético* en la inductancia desaparece y el capacitor se descarga. Por lo tanto, hay un intercambio constante de potencia, o energía, entre la fuente y el circuito, pero no hay *consumo* de potencia. Puesto que la potencia real es la potencia que efectivamente se consume o se disipa en el circuito; en un circuito LC puro la *potencia real* es cero. La potencia aparente, que es la potencia total transmitida por la fuente, es la suma de las potencias transmitidas a la inductancia y a la capacitancia. Es igual a la tensión aplicada multiplicada por la corriente del ciruito, o sea:

$$P_{APARENTE} = E_{AP}I$$

El factor de potencia del circuito es igual al coseno del ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente, como en cualquier circuito de c-a. Puesto que el ángulo de fase en un circuito en serie LC siempre es de 90° y el coseno de 90° es cero, el factor de potencia en un circuito LC es cero. La potencia real en un circuito de c-a es igual a la potencia aparente multiplicada por el factor de potencia: ésta es otra forma de demostrar que la potencia real en un circuito en serie LC siempre es cero.

$$P_{REAL} = E_{AP}I \cos \theta$$
$$= E_{AP}I \times 0 = 0$$

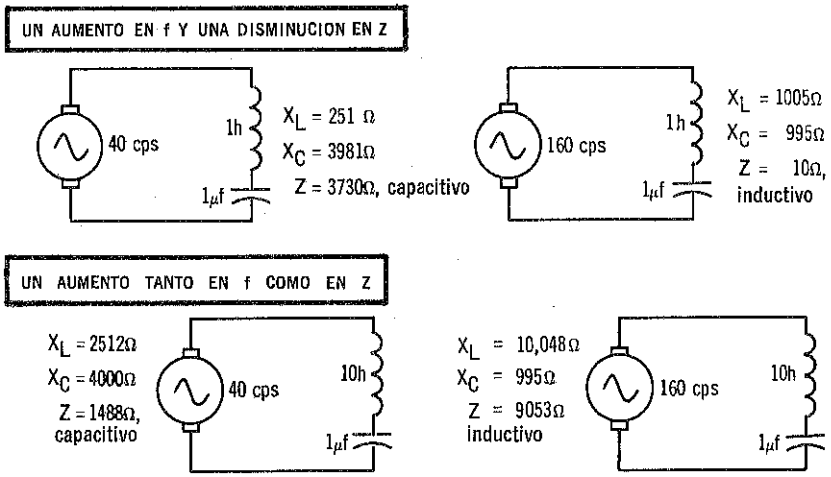
En realidad, todos los circuitos tienen algo de resistencia, de manera que el factor de potencia nunca es cero debido a la potencia disipada por la resistencia. Sin embargo, cuando la resistencia es muy baja, para toda aplicación práctica puede considerarse el factor de potencia como cero.

efecto de la frecuencia

En los circuitos en serie RL y RC, existe una relación definida entre la *impedancia* y la *frecuencia* de la tensión aplicada. El *aumentar* la frecuencia de un circuito RL o disminuir la frecuencia de un circuito RC, resulta en un *aumento* de *impedancia*. En forma similar, el *disminuir* la frecuencia en un circuito RL o aumentar la frecuencia en un circuito RC, ocasiona una *disminución* en *impedancia*.

Sin embargo, en circuitos en serie LC, no existe una relación similar tan marcada entre la impedancia y la frecuencia. La impedancia está controlada por la frecuencia, pero un aumento o disminución en la frecuencia depende de los *valores relativos* de la reactancia inductiva y la capacitiva. Por ejemplo, en un circuito, un aumento de frecuencia puede

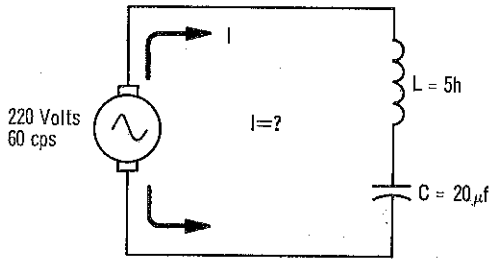
El efecto de cambio de frecuencia en circuitos en serie LC depende de los valores relativos de X_L y X_C



Aunque la impedancia está controlada por la frecuencia, no se puede especificar relación. Como se muestra, el aumento idéntico en la frecuencia puede causar un aumento en la impedancia de un circuito y una disminución en otra

producir un aumento de impedancia en tanto que, en otro circuito, el mismo aumento de frecuencia podría ocasionar una disminución en la impedancia. De la misma manera, una disminución de capacitancia puede producir un aumento en la impedancia de un circuito y una disminución en otro. Puede presentarse la situación en la cual cierto aumento, por ejemplo en la inductancia, origine una disminución de impedancia en tanto que un aumento posterior de la inductancia, haga que la impedancia aumente. Por lo tanto, generalmente es preferible calcular con precisión la nueva impedancia siempre que ocurra un cambio en la frecuencia de un circuito en serie LC.

problemas resueltos (cont.)



Problema 18. ¿Cuál es la corriente en el circuito?

Según la ley de Ohm para circuitos de c-a, la ecuación para calcular la corriente es $I = E_{AP}/Z$. La tensión está dada, pero la impedancia no, por lo que debe calcularse esta última. Sin embargo, antes de que se pueda calcular la impedancia, deberán determinarse las dos reactancias, X_L y X_C. Así, pues, la secuencia para resolver este problema es calcular primero X_L y X_C, luego Z, y, finalmente, I.

Cálculo de X_L y X_C:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 60 \times 5 = 1{,}884 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 60 \times 0.00002} = 133 \text{ ohms}$$

Cálculo de Z: X_L es mayor que X_C, de manera que la ecuación para Z es:

$$Z = X_L - X_C = 1{,}884 - 133 = 1{,}751 \text{ ohms, inductiva}$$

Cálculo de I:

$$I = E_{AP}/Z = 220 \text{ volts}/1{,}751 \text{ ohms} = 0.125 \text{ ampere}$$

Problema 19. ¿Cuál es el ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente del circuito anterior?

El ángulo de fase es de 90° en todos los circuitos LC puros; por lo tanto, en este circuito, el ángulo debe ser de 90°. Y puesto que la impedancia era inductiva, la tensión aplicada estará adelantada con respecto a la corriente.

Problema 20. ¿Cuáles son las caídas de tensión en las reactancias?

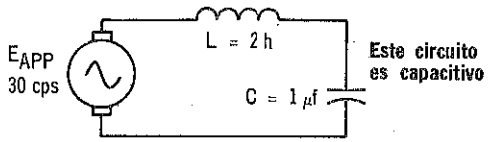
Cada caída de tensión es independiente, dependiendo sólo de la corriente del circuito y del valor de la reactancia. Así pues,

$$E_L = IX_L = 0.125 \times 1{,}884 = 236 \text{ volts}$$
$$E_C = IX_C = 0.125 \times 133 = 17 \text{ volts}$$

Nótese que la caída de tensión en la inductancia (E_L) es mayor que la tensión aplicada de 220 volts.

problemas resueltos (cont.)

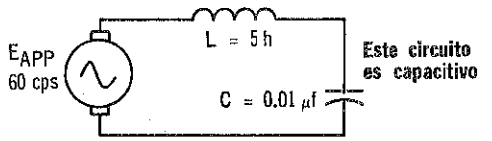
Problema 21. ¿Cuáles de los siguientes circuitos son inductivos y cuáles son capacitivos?



$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 30 \times 2 = 377 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 30 \times 0.000001} = 5{,}300 \text{ ohms}$$

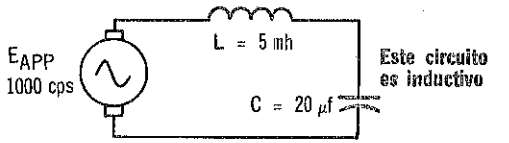
$$Z = X_C - X_L = 5{,}330 - 337 = 4{,}293 \text{ ohms, capacitiva}$$



$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 60 \times 5 = 1{,}884 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 60 \times 0.0000001} = 265\text{K}$$

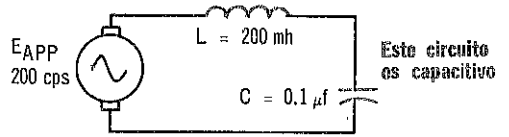
$$Z = X_C - X_L = 265{,}000 - 1{,}884 \cong 263\text{K, capacitiva}$$



$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 1{,}000 \times 5 = 31 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 1{,}000 \times 0.000020} = 8 \text{ ohms}$$

$$Z = X_L - X_C = 31 - 8 = 23 \text{ ohms, inductiva}$$



$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 200 \times 200 = 251 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 200 \times 0.0000001} = 7{,}900 \text{ ohms}$$

$$Z = X_C - X_L = 7{,}900 - 251 = 7{,}649 \text{ ohms, capacitiva}$$

resumen

☐ Un circuito en serie LC consta de una inductancia y una capacitancia en serie, sin resistencia en el circuito. ☐ Puesto que la corriente es la misma en todo el circuito, se usa como referencia de fase. ☐ La tensión en el inductor de un circuito en serie LC está adelantada 90° con respecto a la corriente que fluye por él. Es igual a: $E_L = IX_L$. ☐ La tensión en el capacitor está atrasada 90 grados con respecto a la corriente en el mismo. Es igual a: $E_C = IX_C$. ☐ Debido a que las tensiones están defasadas 180° entre sí, la tensión total o aplicada es igual a la diferencia aritmética de las dos. ☐ El ángulo de fase se determina por la mayor de las dos caídas de tensión.

☐ En un circuito en serie LC, E_L o E_C, en algunos casos ambas, son mayores que la tensión aplicada. ☐ La impedancia de un circuito en serie L_C puede ser o exclusivamente inductiva o exclusivamente capacitiva, según las magnitudes de las reactancias. Generalmente, el tipo de impedancia se especifica después del valor de la impedancia. ☐ La ley de Ohm para circuitos de c-a se aplica a los circuitos en serie LC: $I = E_{AP}/Z$.

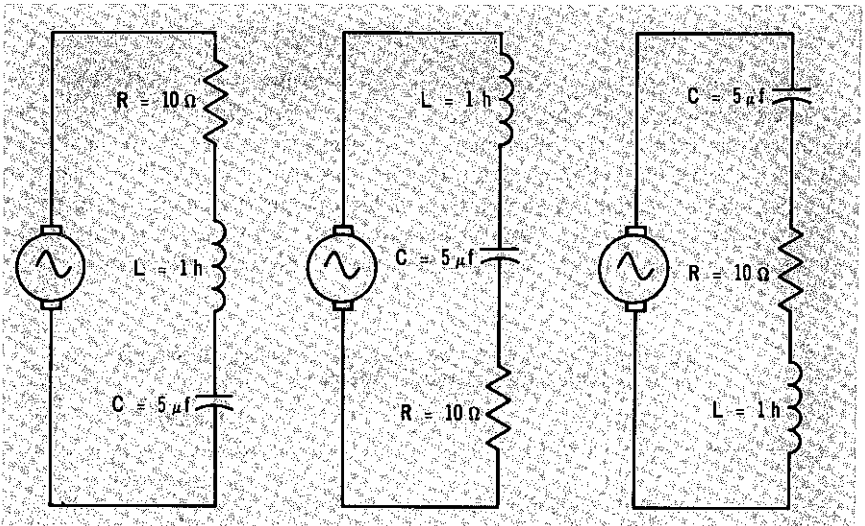
☐ En un circuito en serie LC puro, la potencia real es cero. ☐ El factor de potencia es también cero. ☐ Debido a que tanto X_L y X_C dependen de la frecuencia, no hay relación definida entre la impedancia y la frecuencia. La impedancia depende de los valores relativos de las reactancias inductiva y capacitiva en el circuito.

preguntas de repaso

1. En un circuito en serie LC, ¿puede la tensión en L y/o C alguna vez ser mayor que la tensión aplicada?

Para las preguntas 2 a 10, suponga un circuito en serie LC con una tensión aplicada de 100 volts; un capacitor con una caída de tensión de 140 volts; y un inductor con una reactancia inductiva de 20 ohms.

2. ¿Cuál es la corriente en el circuito?
3. ¿Cuál es la impedancia en el circuito?
4. ¿Cuál es la potencia aparente del circuito?
5. ¿Cuál es la potencia real del circuito?
6. ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito?
7. ¿Cuál es el factor de potencia del circuito?
8. ¿Cuál es la reactancia capacitiva?
9. Responda las preguntas 2 a 8, en el caso en que se duplique la frecuencia de la tensión aplicada. (Advertencia: la tensión en el capacitor ya no es de 140 volts.)
10. Responda las preguntas 2 a 8, si se reduce a la mitad la frecuencia de la tensión aplicada.



En circuitos en serie LCR, la secuencia en que están conectadas las inductancias, la capacitancia y la resistencia, no tienen efecto en el circuito. Por lo tanto, los tres diagramas del circuito son idénticos

circuitos en serie LCR

Cualquier circuito práctico en serie LC tiene cierto grado de resistencia. Cuando ésta es muy pequeña en comparación con las reactancias del circuito, casi no tiene efecto en el circuito y se puede considerar nula, tal como se ha hecho en las páginas anteriores. Sin embargo, cuando la resistencia es *apreciable*, tiene un efecto significativo en la operación del circuito y por lo tanto se debe considerar en cualquier análisis de circuitos. Es indiferente que la resistencia sea resultado del alambrado del circuito o de los devanados de la bobina, o de un resistor conectado al circuito. En tanto sea apreciable, afectará el funcionamiento del circuito y deberá considerarse. Por regla general, si la resistencia total del circuito *no* es 10 o más veces mayor que la resistencia, la resistencia *tendrá* un efecto.

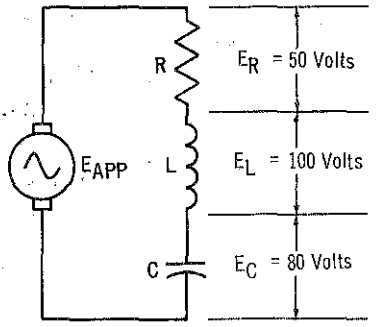
Los circuitos donde la inductancia, capacitancia y resistencia están conectadas todas en serie se llaman circuitos en serie LCR. Se verá que la propiedades fundamentales de los circuitos en serie LCR y los métodos usados para resolverlos, se asemejan a los que se han estudiado para circuitos en serie LC. Las diferencias se encuentran en los efectos de la resistencia.

tensión

Puesto que hay tres elementos en un circuito serie LCR, hay tres caídas de tensión en el circuito: una en la inductancia; una en la capacitancia y la otra en la resistencia. La misma corriente fluye por cada uno de los elementos del circuito, de manera que las relaciones de fase entre las caídas de tensión son iguales a las que se tienen en circuitos en serie LC, RL y RC. Las caídas de tensión en inductancia y capacitancia están defasadas 180°, estando la caída inductiva de tensión (E_L)

La SUMA VECTORIAL de las caídas de voltaje en un circuito en serie LCR es igual al voltaje aplicado

Circuito



Cálculos

$$E_{APP} = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

$$= \sqrt{(50)^2 + (100-80)^2}$$

$$= 54 \text{ Volts}$$

$$\tan \theta = E_X/E_R$$

$$= 20/50 = 0.4$$

$$\theta = 21.8°$$

adelantada 90° con respecto a la caída resistiva (E_R) y la caída capacitiva de tensión (E_C) atrasada 90° con respecto a la caída resistiva de tensión (E_R).

La suma vectorial de las tres caídas de tensión es igual a la tensión aplicada. Sin embargo, para calcular la suma vectorial, debe usarse una *combinación* de los métodos que se han estudiado para circuitos LC, RL y RC. En primer lugar, se debe calcular la caída combinada de tensión de las dos reactancias. Este valor se designa como E_X, y se encuentra, como en circuitos LC puros, restando la caída de tensión reactiva más pequeña, de la mayor. El resultado de este cálculo es la caída de tensión reactiva neta, que puede ser inductiva o capacitiva, dependiendo de cuál de las caídas de tensión sea mayor. Como ecuación, se puede escribir la caída de tensión reactiva neta como sigue:

$$E_X = E_L - E_C$$

si E_L es mayor que E_C; ó

$$E_X = E_C - E_L$$

si E_C es mayor que E_L.

tensión (cont.)

Una vez que se conoce la caída reactiva neta de tensión, se suma vectorialmente a la caída de tensión en la resistencia, usando el teorema de Pitágoras. La ecuación que da esta suma vectorial es

$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + E_X^2}$$

La suma vectorial de las tres caídas de tensión se puede poner en una ecuación, substituyendo en la ecuación anterior los valores de E_X dados en la página anterior. Así pues

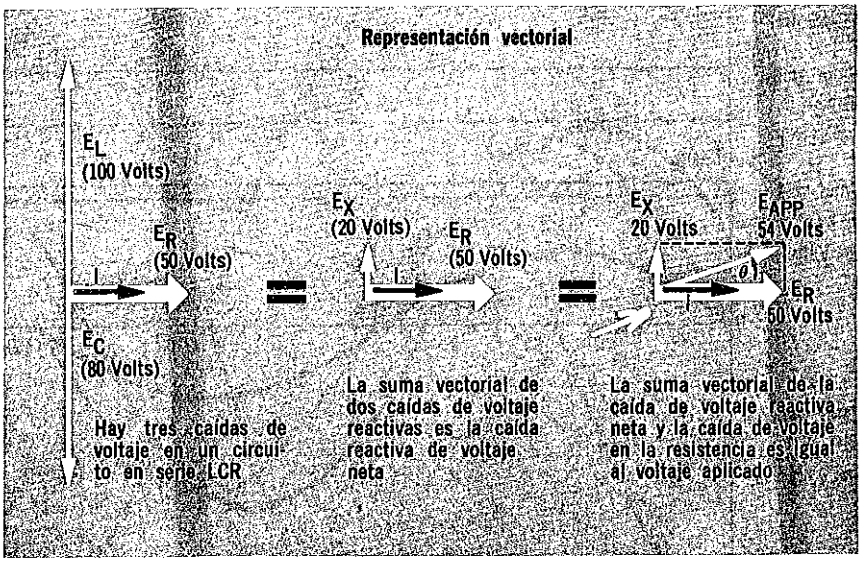
$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

si E_L es mayor que E_C; ó

$$E_{AP} = \sqrt{E_R^2 + (E_C - E_L)^2}$$

si E_C es mayor que E_L.

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
"ACERVO"

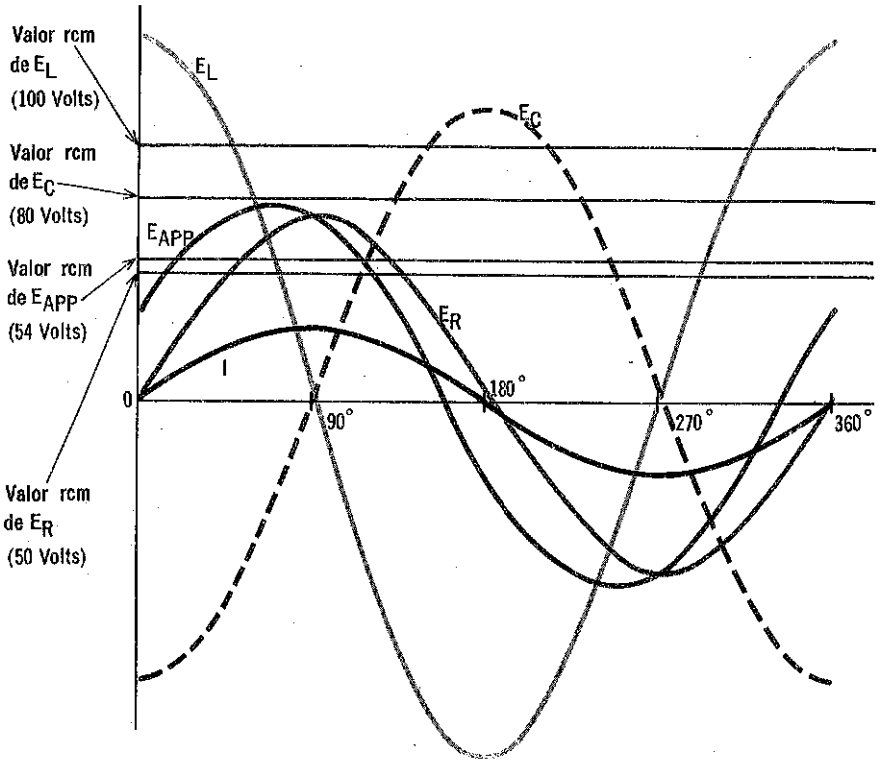


Como se aprecia en los diagramas vectoriales mostrados, el ángulo entre la tensión aplicada (E_{AP}) y la tensión en la resistencia (E_R) es igual al ángulo de fase entre la tensión aplicada y la corriente del circuito. La razón es que E_R e I están en fase. El valor del ángulo de fase se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\tan \theta = E_X/E_R$$

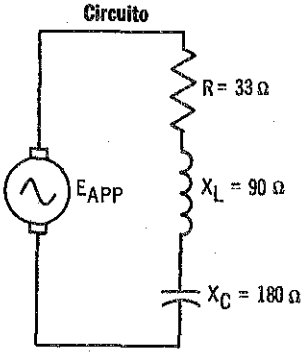
ondas de tensión

Las ondas de tensión en un circuito en serie LCR son una combinación de las que se han observado en los circuitos en serie RL, RC y LC. La onda de tensión aplicada es la suma de los valores instantáneos de tres ondas de tensión, todas defasadas 90°, en lugar de dos tensiones defasadas en menos de 90°, como en los circuitos RL y RC, o de dos tensiones defasadas 180°, como en circuitos LC. Debido a su diferente relación de fase, la adición vectorial de las tres caídas de tensión en un circuito LCR debe efectuarse en dos etapas: primero las dos caídas reactivas de tensión y luego su resultante y la caída resistiva de tensión. Sin embargo, cuando se representan como ondas se pueden sumar simultáneamente las tres caídas de tensión para producir la onda de la tensión aplicada.



Todo punto de la onda de voltaje aplicado (E_{APP}) es la suma algebraica de los valores instantáneos de las ondas de E_L, E_C y E_R

La impedancia de un circuito serie LCR es la SUMA VECTORIAL de la reactancia inductiva, la reactancia capacitiva y la resistencia



Cálculos

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$
$$= \sqrt{(33)^2 + (180 - 90)^2}$$
$$= 96 \text{ Ohms, capacitivo}$$

$$\tan \theta = X/R$$
$$= (180-90)/33 = 2.72$$
$$\theta = 69.8°$$

impedancia

La impedancia de los circuitos en serie LCR es la suma vectorial de la reactancia inductiva, la reactancia capacitiva y la resistencia. Esta adición vectorial es del mismo tipo que se ha estudiado para sumar las caídas de tensión en un circuito en serie LCR. Las dos reactancias están defasadas 180° entre sí, de manera que la reactancia neta, designada como X, se obtiene restando la reactancia más pequeña de la mayor. Por lo tanto,

$$X = X_L - X_C$$

si X_L es mayor que X_C; ó

$$X = X_C - X_L$$

si X_C es mayor que X_L.

Por lo tanto, la impedancia es la suma vectorial de la *reactancia neta* y la *resistencia* y se calcula mediante el teorema de Pitágoras:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Si se combinan las ecuaciones para la reactancia neta y la impedancia, se puede calcular la impedancia a partir de una sola ecuación, que es la siguiente:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

si X_L es mayor que X_C; ó

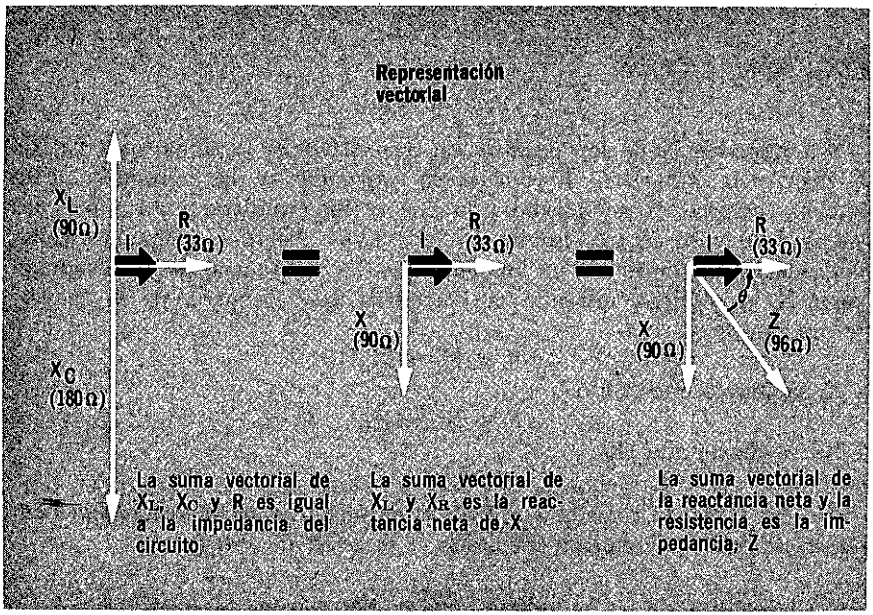
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

si X_C es mayor que X_L.

impedancia (cont.)

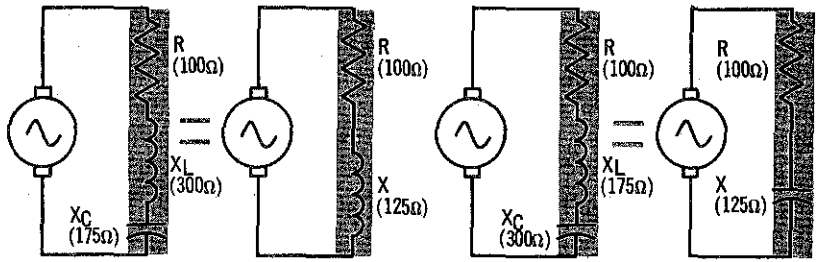
Cuando X_L es mayor que X_C, la reactancia neta es inductiva y el circuito se comporta esencialmente como un *circuito RL*. Esto significa que la impedancia, que es la suma vectorial de la reactancia neta y la resistencia, tendrá un ángulo entre cero y 90°. En forma similar, cuando X_C es mayor que X_L, la reactancia neta es capacitiva y el circuito se comporta como circuito RC. Por lo tanto, la impedancia tiene un ángulo cuyo valor está entre cero y 90°. En ambos casos, el valor del ángulo de la impedancia depende de los valores relativos de la reactancia neta (X) y de la resistencia (R). El ángulo se puede determinar según:

$$\tan \theta = X/R$$



Un punto que se debe notar con respecto a la impedancia de un circuito en serie LCR es que su valor depende de la resistencia y los valores *relativos* de X_L y X_C. Las altas reactancias no significan necesariamente una alta impedancia. Un circuito puede tener reactancias muy grandes pero, si su diferencia, o X, es pequeña, la impedancia será baja para un valor dado de resistencia. Y si R es mayor que X, la impedancia será más resistiva. La regla 10 a 1 se aplica a X y R, lo mismo que a X_L ó X_C y R, en los circuitos correspondientes RL o RC.

La corriente en un circuito serie LCR se calcula de la ley de Ohm para circuitos de c-a $I = E_{APP}/Z$



Cuando X_L es mayor que X_C, el circuito funciona como un circuito RL, de manera que la corriente está atrasada con respecto al voltaje

Cuando X_C es mayor que X_L, el circuito funciona como un circuito RC de manera que la corriente está adelantada con respecto al voltaje

corriente

La misma cantidad de corriente fluye en todas las partes de un circuito en serie LCR. Si se conocen la impedancia y la tensión aplicada se puede calcular la magnitud de la corriente aplicando la ley de Ohm para circuitos de c-a

$$I = E_{AP}/Z$$

La corriente siempre está adelantada 90° con respecto a la tensión en la capacitancia, atrasada 90° con respecto a la tensión en la inductancia y en fase con la tensión en la resistencia. Sin embargo, la relación de fase entre la corriente y la tensión aplicada depende de la *impedancia* del circuito. Si la impedancia es *inductiva* (X_L mayor que X_C), la corriente es inductiva, y está *atrasada* en menos de 90° con respecto a la tensión aplicada. Y si la impedancia es *capacitiva* (X_C mayor que X_L), la corriente es capacitiva y está *adelantada* con respecto a la tensión aplicada por un ángulo de fase también menor que 90°. El ángulo de adelanto o atraso está determinado por los valores relativos de la reactancia neta y la resistencia, según la ecuación:

$$\tan \theta = X/R$$

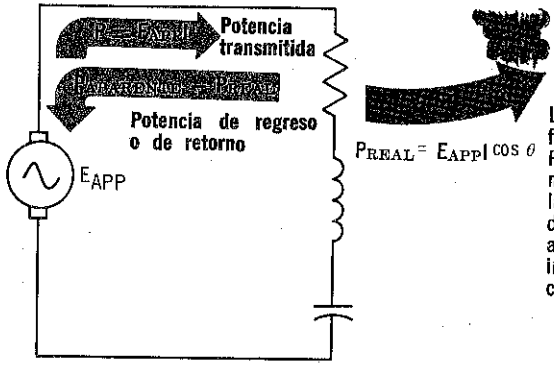
Cuanto mayor sea el valor de X, o menor el valor de R, mayor será el ángulo de fase y más reactiva (o menos resistiva) la corriente. En forma similar, cuanto menor sea el valor de X o mayor el valor de R, la corriente es más resistiva (o menos reactiva). Si de R o X una de ellas es 10 o más veces mayor que la otra, el circuito se comportará esencialmente como si fuese exclusivamente resistivo o reactivo, según el caso.

Otras ecuaciones útiles para calcular el ángulo de fase, se pueden derivar a partir de los diagramas vectoriales que determinan la impedancia y la tensión aplicada. Dos de estas ecuaciones son las siguientes:

$$\cos \theta = R/Z \qquad \tan \theta = E_X/E_R$$

potencia

Téngase presente que en un circuito LC *puro*, la potencia real es cero ya que toda la potencia que transmite la fuente regresa a ella. En un circuito LCR, la potencia transmitida a la inductancia y a la capacitancia también regresa a la fuente; pero, además, hay *disipación* de potencia por la *resistencia* en forma de calentamiento I^2R. Esta potencia representa potencia real ya que, por definición, la potencia real es la potencia disipada o "utilizada" en el circuito. La cantidad de potencia real depende del valor de la resistencia y el flujo de la corriente. Según se ha señalado previamente, la impedancia de un circuito en serie LCR y por lo tanto la corriente del circuito, se determina en gran parte según el grado de *proximidad* que tengan los valores de X_L y X_C. Cuanto más se aproximen sus valores, menor será la impedancia, mayor la corriente del circuito y mayor la potencia real para una resistencia dada. Se puede apreciar, pues, que cualquier cosa que afecte los valores relativos de X_L y X_C afectará también la potencia disipada en el circuito.



La potencia total transmitida por la fuente, es la potencia aparente. Parte de esta potencia aparente, llamada potencia real, es disipada por la resistencia del circuito en forma de calor. El resto de la potencia aparente regresa a la fuente por la inductancia y la capacitancia del circuito.

El valor de la potencia real en un circuito en serie LCR se puede calcular de la ecuación normal de la potencia en circuitos de c-a:

$$P_{REAL} = E_{AP} I \cos \theta$$

La ecuación también se puede expresar así: $P_{REAL} = I^2 Z \cos \theta$; y, puesto que de un diagrama vectorial para impedancia, $R = Z \cos \theta$, la potencia real también se puede expresar como:

$$P_{REAL} = I^2 R$$

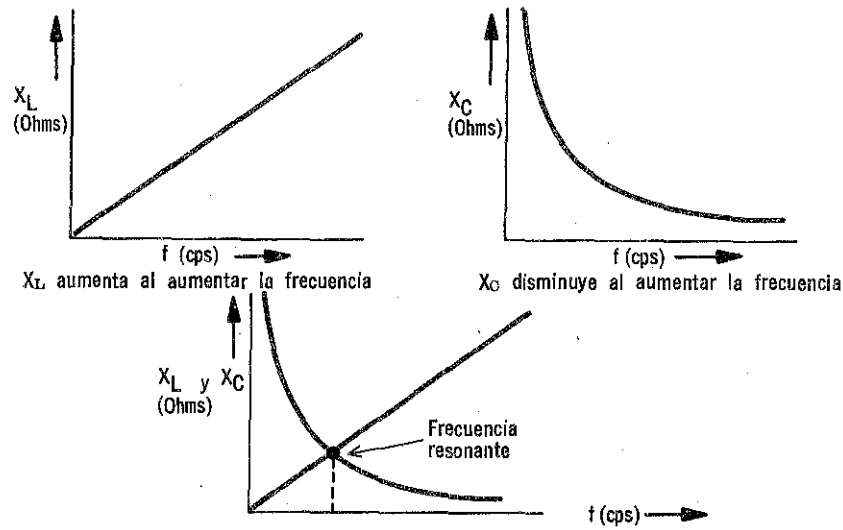
La potencia aparente, que es la potencia total que *transmite* la fuente, es simplemente igual a la tensión aplicada, multiplicada por la corriente del circuito o

$$P_{APARENTE} = E_{AP} I$$

efecto de frecuencia

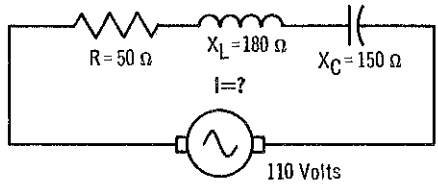
Tengamos presente que en circuitos en serie LC, aunque la frecuencia afecta las características del circuito, no existe una relación específica clara entre un aumento o disminución de la frecuencia con un aumento o disminución correspondiente en la impedancia o en la corriente del circuito. Esto se debe a que, al aumentar la frecuencia, también aumenta X_L, pero X_C disminuye; y cuando disminuye la frecuencia, aumenta X_C en tanto que X_L disminuye. Por otra parte, la impedancia varía con la *diferencia* entre X_L y X_C. Por lo tanto, el que la impedancia aumente o disminuya depende de cuáles hayan sido los valores *relativos* de X_L y X_C antes de ocurrir el cambio de frecuencia.

Según se verá más tarde, para todo circuito en serie LCR existe una frecuencia, llamada *frecuencia resonante*, a la cual X_L y X_C son iguales. La frecuencia se determina por los valores de la inductancia y la capacitancia y no resulta afectada por la resistencia del circuito. Todo cambio de frecuencia respecto a la frecuencia resonante tendrá como resultado un aumento de la reactancia neta y de la impedancia y una disminución correspondiente en la corriente. Un cambio que *aproxime* a la frecuencia resonante tendrá el efecto opuesto. La reactancia neta y la impedancia disminuirán, de manera que la corriente del circuito aumentará. Esto se estudiará posteriormente.



Para cualquier combinación de inductancia y capacitancia, las curvas de X_L y X_C se intersecan en un punto, en el que los valores de X_L y X_C son iguales, y corresponde a la frecuencia resonante. Cualquier cambio de frecuencia de este punto resulta un aumento de impedancia. Recíprocamente, si la frecuencia se acerca a este punto, la frecuencia disminuye

problemas resueltos



Problema 22. ¿Cuál es la corriente en el circuito?

La corriente se calcula a partir de la ecuación $I = E_{AP}/Z$. La tensión aplicada está dada, pero la impedancia debe determinarse antes de que se pueda calcular la corriente.

Cálculo de Z: X_L es mayor que X_C, de manera que la ecuación para Z es:

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(50)^2 + (180 - 150)^2} = 58$ ohms, inductiva

Cálculo de I:

$$I = E_{AP}/Z = 110 \text{ volts}/58 \text{ ohms} = 1.9 \text{ amperes}$$

Problema 23. ¿Qué relación existe entre la corriente y la tensión aplicada?

Con la ecuación conocida se puede calcular el ángulo de fase θ entre la corriente y la tensión aplicada de acuerdo con cualquiera de las siguientes ecuaciones: $\tan \theta = X/R$ ó $\cos \theta = R/Z$

$$\tan \theta = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{30}{50} = 0.6 \qquad \theta = 31°$$

$$\cos \theta = R/Z = 50/58 = 0.862 \qquad \theta = 31°$$

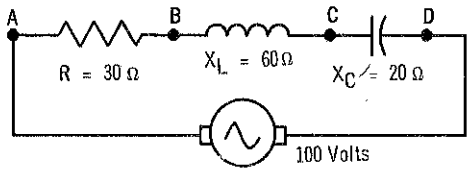
La impedancia del circuito es inductiva, ya que X_L es mayor que X_C, de manera que la corriente está atrasada con respecto a la tensión aplicada, como lo está en todos los circuitos inductivos. Por lo tanto, una descripción completa de la relación de fase entre la corriente y la tensión aplicada, es que la corriente está atrasada 31° con respecto a la tensión.

Problema 24. ¿Cuánta potencia consume el circuito?

La potencia consumida es potencia real y se sabe que la potencia real se puede calcular por medio de la ecuación $P_{REAL} = E_{AP} I \cos \theta$. Sin embargo, se sabe también que otra forma de la ecuación para la potencia real es $P_{REAL} = I^2R$. Puesto que se conocen los valores tanto de I como de R, se puede utilizar esta ecuación. Con frecuencia, al usar esta ecuación se evita la necesidad de buscar el valor de θ en tablas trigonométricas.

$$P_{REAL} = I^2R = (1.9)^2 \times 50 = 181 \text{ watts}$$

problemas resueltos (cont.)



Problema 25. ¿Cuáles son las caídas de tensión entre AB, BC, CD, BD y AC?

Antes de que se puedan determinar las caídas de tensión, tiene que calcularse la corriente del circuito; pero antes de que esto pueda hacerse, debe determinarse la impedancia. X_L es mayor que X_C, de manera que la impedancia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(30)^2 + (60 - 20)^2}$$
$$= \sqrt{2{,}500} = 50 \text{ ohms, inductiva}$$

Ahora puede determinarse la corriente mediante la ley de Ohm:

$$I = E_{AP}/Z = 100 \text{ volts}/50 \text{ ohms} = 2 \text{ amperes}$$

Conociendo la corriente, se pueden calcular las caídas de tensión:

Cálculo de la caída de tensión AB: La caída de tensión en la resistencia es igual a la corriente multiplicada por la resistencia.

$$E_R = IR = 2 \text{ amperes} \times 30 \text{ ohms} = 60 \text{ volts}$$

Cálculo de la caída de tensión BC: La caída de tensión en la inductancia es igual a la corriente multiplicada por la reactancia inductiva.

$$E_L = IX_L = 2 \text{ amperes} \times 60 \text{ ohms} = 120 \text{ volts}$$

Cálculo de la caída de tensión CD: La caída de tensión en la capacitancia es igual a la corriente multiplicada por la reactancia capacitiva.

$$E_C = IX_C = 2 \text{ amperes} \times 20 \text{ ohms} = 40 \text{ volts}$$

Cálculo de la caída de tensión BD: La caída de tensión BD es la tensión neta, E_X, en ambas reactancias. Es igual a la diferencia entre las dos tensiones individuales E_L y E_C.

$$E_X = E_L - E_C = 120 - 40 = 80 \text{ volts}$$

Cálculo de la caída de tensión AC: la caída de tensión AC es la suma vectorial de las caídas de tensión en la resistencia y la inductancia. Estas dos tensiones están defasadas 90° entre sí, de manera que se pueden sumar vectorialmente mediante el teorema de Pitágoras:

$$E_{CA} = \sqrt{E_R^2 + E_L^2} = \sqrt{(60)^2 + (120)^2} = 134 \text{ volts}$$

resumen

☐ Un circuito en serie LCR consta de un inductor, un resistor y un capacitor en serie. ☐ La reactancia neta del circuito determina si el circuito se comportará como un circuito RL o RC. ☐ La tensión reactiva total de un circuito LCR se obtiene por: $E_X = E_L - E_C$ para E_L mayor que E_C; y $E_X = E_C + E_L$ para E_C mayor que E_L. ☐ La tensión aplicada es igual a la suma vectorial de la tensión del resistor y la tensión reactiva total: $E_{AP} = \sqrt{E_R + E_X{}^2}$. El ángulo de fase se obtiene por $\tan \theta = E_X/E_R$; ó $\tan \theta = X/R$ ó $\cos \theta = R/Z$.

☐ La impedancia de un circuito en serie LCR es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia neta: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, donde X es la reactancia neta, y es igual a $X_L - X_C$ ó $X_C - X_L$. ☐ La corriente es igual a: $I = E_{AP}/Z$. Está adelantada o atrasada respecto a la tensión aplicada, dependiendo de la reactancia neta del circuito.

☐ A diferencia de un circuito LC puro, el circuito LCR disipa potencia en el resistor: $P_{REAL} = E_{AP}I \cos \theta = I^2Z \cos \theta = I^2R$. ☐ La potencia aparente es igual a: $P_{APARENTE} = E_{AP}I$. ☐ La potencia real también se determina según la relación $P_{REAL} = P_{APARENTE} \times$ factor de potencia. ☐ La frecuencia a la cual la reactancia neta es cero o a la cual X_L es igual a X_C, se conoce como frecuencia resonante.

preguntas de repaso

1. ¿Puede ser mayor la tensión en el inductor o en el capacitor que la tensión aplicada en un circuito en serie LSR?
2. ¿Puede la tensión en el resistor de un circuito en serie LCR ser mayor que la tensión aplicada?

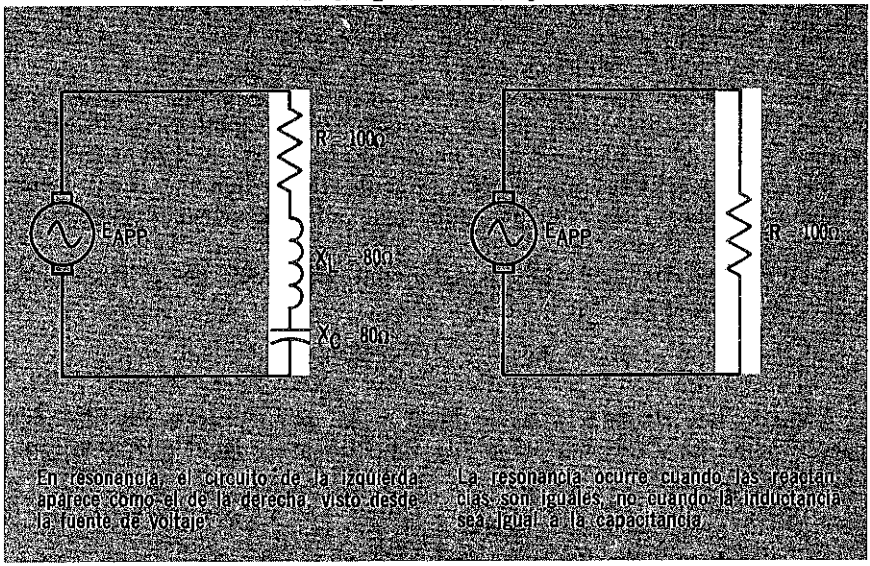
Para las preguntas 3 a 8, suponga un circuito en serie LCR con una tensión aplicada de 200 volts, una impedancia de 100 ohms, una reactancia inductiva de 50 ohms, y una reactancia capacitiva de 130 ohms.

3. ¿Cuál es el valor de la resistencia?
4. ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito?
5. ¿Cuál es la corriente en el circuito?
6. ¿Cuál es la potencia aparente? ¿Cuál es la potencia real?
7. ¿Cuál sería la impedancia si se duplicara la frecuencia?
8. ¿Cuál sería la impedancia si se redujera la frecuencia a la mitad?
9. La tensión aplicada a un circuito serie LCR es 200 volts, la tensión en el resistor es 180 volts, y la tensión en el inductor es 300 volts. ¿Qué valores pueden existir en el capacitor?
10. Responda la pregunta 9, si la tensión en el inductor es de 100 volts. (*Advertencia:* sólo hay una solución.)

resonancia en serie

La resonancia ha sido descrita brevemente como un estado que existe cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva de un circuito en serie LCR son *iguales*. Cuando esto sucede, ambas reactancias se *anulan* y la impedancia de circuito es igual a la resistencia. Por lo tanto, la corriente encuentra oposición solamente en la resistencia y si la resistencia es relativamente baja, pueden fluir *corrientes muy grandes*. Sin embargo, debe recordarse que ambas reactancias se anulan entre sí sólo por lo que respecta a su oposición a la corriente. Continúan presentes en el circuito y, debido a la magnitud de la corriente que fluye cuando son iguales, existen caídas de tensión muy elevadas en ellas.

La resonancia en serie ocurre cuando: X_L ES IGUAL A X_C



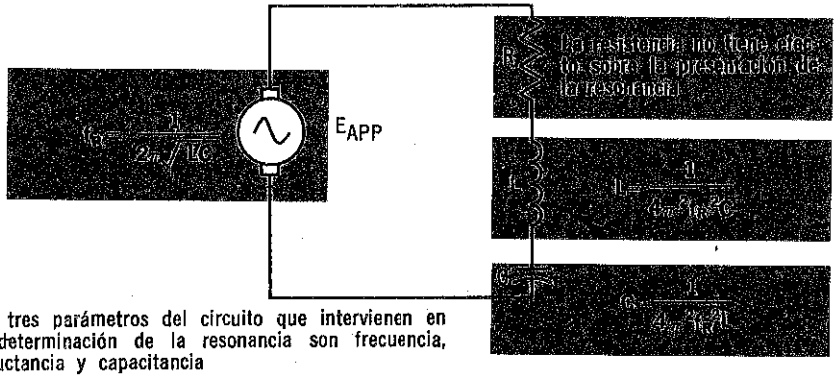
En resonancia, el circuito de la izquierda aparece como el de la derecha visto desde la fuente de voltaje.

La resonancia ocurre cuando las reactancias son iguales, no cuando la inductancia sea igual a la capacitancia.

Las dos características por las que se identifica la resonancia en un circuito en serie LCR son *baja impedancia* y *corriente elevada*. En realidad, dondequiera que hay resonancia en un circuito, la impedancia es mínima y la corriente máxima.

El tipo de resonancia que se describe es en realidad la *resonancia en serie*. Esto es para distinguirla de otro tipo de resonancia llamada *resonancia en paralelo*, que ocurre en circuito en paralelo LCR. La resonancia en paralelo se estudiará posteriormente.

factores que determinan la resonancia



Los tres parámetros del circuito que intervienen en la determinación de la resonancia son frecuencia, inductancia y capacitancia

Cuando X_L y X_C son iguales hay resonancia y, por lo tanto, la resonancia es afectada por la *frecuencia* de la tensión aplicada, la *inductancia* y la *capacitancia*. La frecuencia afecta tanto a X_L como a X_C, en tanto que la inductancia afecta sólo a X_L y la capacitancia sólo a X_C.

Para cualquier combinación de una inductancia y una capacitancia determinadas hay una frecuencia a la cual X_L *será igual* a X_C. Esta frecuencia recibe el nombre de *frecuencia resonante* de esa combinación en particular. Por ejemplo, una combinación de una inductancia de 1 henry y una capacitancia de 4 microfarads tiene una frecuencia resonante de 80 cps.

Los valores de X_L y X_C en un circuito dependen de la frecuencia, según las ecuaciones:

$$X_L = 2\pi fL \qquad y \qquad X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Cuando hay resonancia X_L es igual a X_C, por lo tanto, los segundos miembros de estas dos ecuaciones también deben ser iguales en este caso. De manera que,

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Cuando se despeja f, el resultado es

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Por medio de esta ecuación se puede determinar la frecuencia resonante —generalmente designada como f_R— de cualquier combinación de L y C. También se puede determinar el valor de inductancia que resonará con un valor particular de capacitancia a cierta frecuencia, y viceversa, mediante las siguientes ecuaciones:

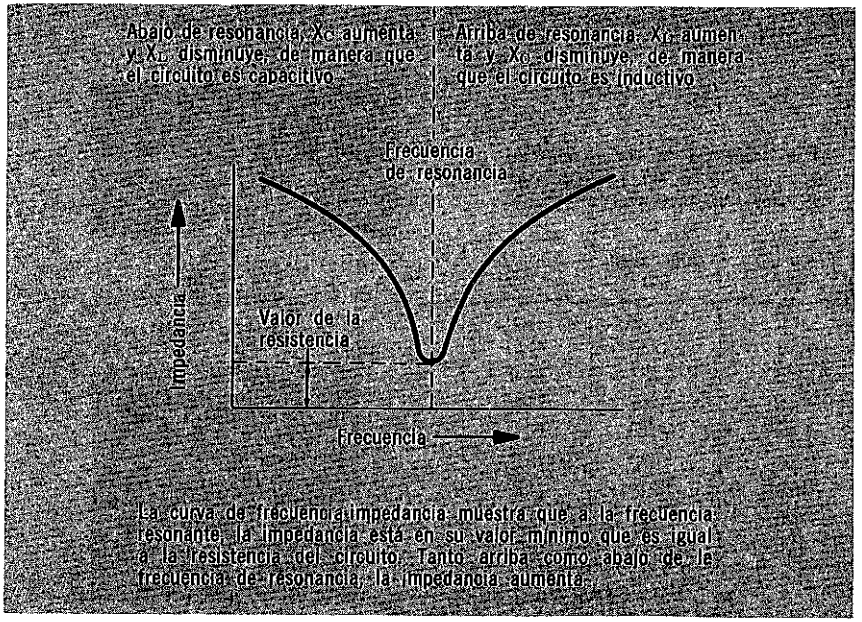
$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2 C} \qquad C = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2 L}$$

impedancia en resonancia y fuera de resonancia

En la mayor parte de las aplicaciones prácticas de circuitos resonantes en serie, los valores de la inductancia y la capacitancia son fijos y la frecuencia es la cantidad variable que determina si un circuito está en resonancia o no. A la frecuencia resonante, X_L y X_C se anulan entre sí y la impedancia de circuito es igual al valor de la resistencia.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + 0} = R$$

Por lo tanto, el circuito es completamente *resistivo*.



Si la frecuencia varía en valores superiores o inferiores a los de la frecuencia resonante, la reactancia neta —que es la diferencia entre X_L y X_C— ya no es cero. Por lo tanto, la reactancia neta debe sumarse a la resistencia, de modo que la impedancia aumenta. Cuanto más varía la frecuencia del valor resonante, mayor será la reactancia neta y más alta la impedancia. Una característica de los circuitos resonantes en serie es que, cuando la frecuencia está *arriba* de la frecuencia resonante, X_L es mayor que X_C, de manera que el circuito es *inductivo*; y cuando la frecuencia es *inferior* a la frecuencia resonante, X_C es mayor que X_L y el circuito es *capacitivo*.

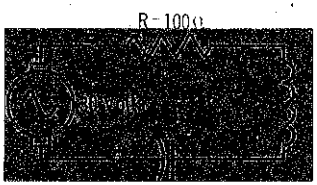
corriente en resonancia y fuera de resonancia

Cuando hay resonancia, la *impedancia* de un circuito en serie LCR es *mínimo*; por lo tanto, la *corriente* debe ser *máxima*. Tanto *arriba* como *abajo* de la frecuencia resonante, la impedancia del circuito aumenta, lo cual significa que la *corriente* disminuye. Cuanto más difieran la frecuencia y el valor resonante, mayor será la impedancia y más pequeña se volverá la corriente. A cualquier frecuencia, mediante la ley de Ohm puede calcularse la corriente en circuitos de c-a, de acuerdo con la ecuación I = E/Z. A la frecuencia resonante, la impedancia es igual a la resistencia, por lo tanto, la ecuación para calcular la corriente en resonancia se convierte en I = E/R.

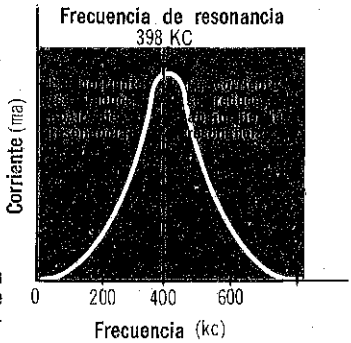
Si varía la frecuencia de un circuito LCR y se trazan en una gráfica, los valores de corriente a las diferentes frecuencias, el resultado es una curva que se conoce como *curva de resonancia* del circuito.

Si la frecuencia del voltaje aplicada varía de 100 a 600 kc, éstos son los valores de impedancia y corriente

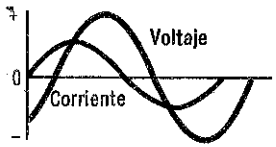
Frecuencia (kc)	Impedancia (Ω)	Corriente (ma)
100	18,634	1.61
200	7,433	4.0
300	2,862	10.48
350	1,270	23.6
398	100	300
400	122	246
450	1,240	24.2
500	2,302	13.0
600	4,221	7.1



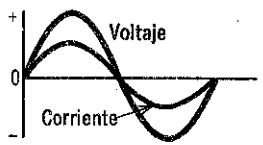
Y ésta es la curva de resonancia



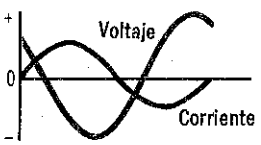
Esta es la forma característica de la curva de resonancia. Las curvas de resonancia reales, no siempre son simétricas



Arriba de la resonancia, la impedancia es capacitiva de manera que la corriente está adelantada con respecto al voltaje

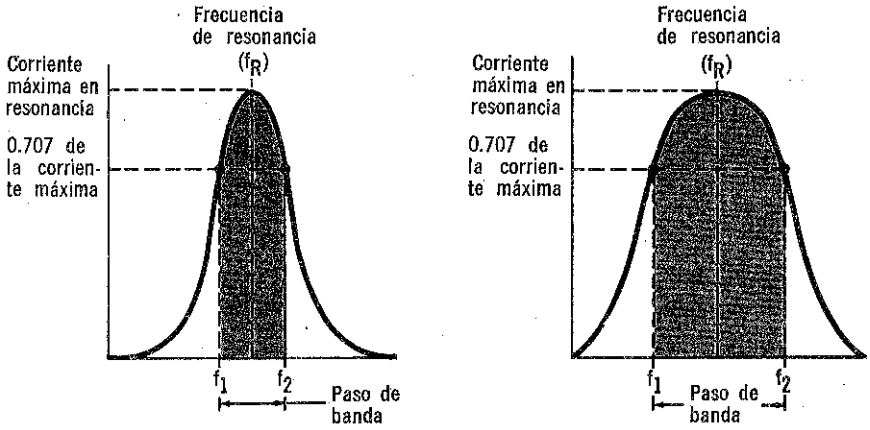


En resonancia, la impedancia es igual a la resistencia, de manera que la corriente y el voltaje están en fase



Abajo de resonancia, la impedancia es inductiva, de manera que el voltaje está adelantado con respecto a la corriente

banda de resonancia



LA BANDA DE RESONANCIA O EL PASO DE BANDA ES IGUAL f_2-f_1

El rango de frecuencias en el cual la corriente tiene un valor de 0.707 o más veces su valor a la frecuencia resonante se llama banda de resonancia o paso de banda

Según la curva de resonancia que se observa en la página anterior se aprecia que la corriente alcanza su máximo sólo a la frecuencia resonante, pero existe un pequeño *rango* de frecuencias tanto inferiores como superiores a la de resonancia, en el cual el valor de la corriente es casi tan grande como en resonancia. En la práctica se considera que, dentro de este rango o banda de frecuencias, el circuito está en resonancia. Esta banda de frecuencias se llama *banda de resonancia* o *banda de paso* del circuito y sirve como base para clasificar o comparar circuitos que se usan por sus propiedades resonantes. Normalmente se considera que la banda de paso es el rango de frecuencias entre las cuales la corriente del circuito es 0.707 veces o más de su valor a resonancia. De manera que si la corriente en determinado circuito es de 2 amperes en resonancia, la banda de paso del circuito es la parte de la curva de resonancia que está entre los dos puntos que corresponden a 1.414 amperes (0.707 × 2); puede apreciarse que la anchura de la banda de paso depende de la *forma* de la curva de resonancia. En las curvas que, debido a su forma, hay una *amplia separación* entre los puntos correspondientes a 0.707 de la corriente de resonancia, tienen una *banda de paso ancha.* En los que hay una *pequeña* separación entre los puntos de 0.707, tienen una *banda de paso angosta.*

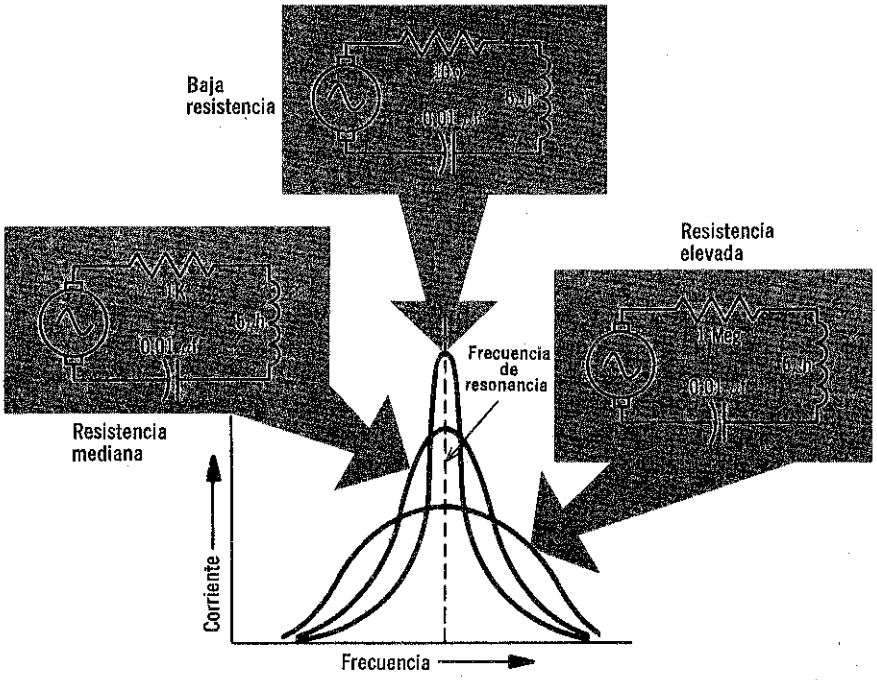
La banda de resonancia o banda de paso de un circuito también se conoce como *anchura de banda.* Los tres términos significan lo mismo.

efecto que tiene la resistencia en la banda de resonancia

La frecuencia resonante de un circuito en serie LCR sólo depende de los valores de la inductancia y la capacitancia. La resistencia del circuito no tiene ninguna relación con la frecuencia resonante. Esto es obvio en la ecuación que se usa para calcular la frecuencia resonante:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Cualesquiera dos valores de L y C, cuyo producto sea el mismo, tendrán la misma frecuencia resonante, independientemente de la resistencia del circuito.

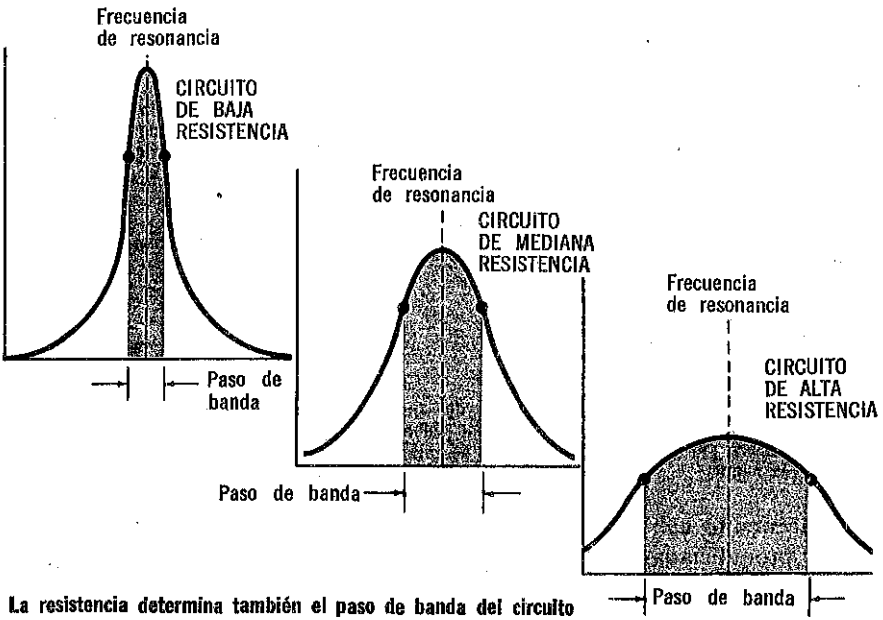


La resistencia del circuito determina la forma de la curva de resonancia

La resistencia no interviene en la determinación de la frecuencia resonante, sin embargo, afecta a la corriente que fluye en resonancia. Puesto que la impedancia en resonancia es igual a la resistencia del circuito, la corriente resonante está limitada solamente por los valores de la resistencia. Si la resistencia es pequeña, se tendrá una corriente elevada en resonancia. Y si la resistencia es grande, la corriente será pequeña, aun cuando la frecuencia resonante sea la misma.

efecto que tiene la resistencia en la banda de resonancia (cont.)

Puesto que la curva de resonancia de un circuito LCR muestra cómo varía la corriente con respecto a la frecuencia, la forma de la curva depende del valor de la resistencia del circuito. Como puede apreciarse, cuanto mayor sea la resistencia, *menor* será la altura máxima de la curva. Esto se debe a que el punto más alto de la curva corresponde a la corriente en resonancia. Además, cuanto mayor sea la resistencia, más *achatada* es la curva. Esto se debe a que, fuera de resonancia, la forma de la curva, o sea, la corriente del circuito, está controlada tanto por la reactancia neta como por la resistencia. La reactancia neta depende de la frecuencia, pero la resistencia permanece invariable para todas las frecuencias. De manera que, cuanto mayor sea la resistencia, mayor será el control relativo que tiene sobre la corriente y más tiende a limitar la corriente a un valor constante.



La resistencia determina también el paso de banda del circuito

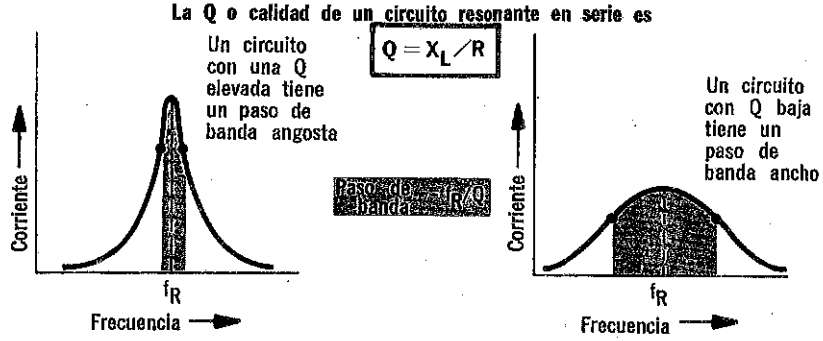
Cuanto más chata sea una curva de resonancia, los puntos que corresponden a 0.707 estarán más separados de la corriente de pico o resonante. Esto significa que cuanto más chata sea la curva, más ancha será la banda de paso; y puesto que la resistencia determina qué tan achatada será la curva de resonancia, cuanto *más alta* sea la *resistencia, más ancha* será la *banda de paso*. En forma similar, cuanto más *baja* sea la *resistencia,* más *angosta* será la *banda de paso.*

calidad

En resonancia, la caída de tensión en la resistencia de un circuito resonante en serie es igual a la tensión aplicada, en tanto que las caídas de tensión en la inductancia y la capacitancia generalmente son muchas veces mayores. La relación de la caída de tensión en resonancia ya sea de la inductancia o la capacitancia con la que existe en la resistencia, se usa para expresar la *calidad* de un circuito resonante en serie. Esta relación se conoce como la Q del circuito y es igual a E_L/E_R ó E_C/E_R. Puesto que E_L y E_C son iguales en resonancia, se puede utilizar cualquiera de ambos valores para determinar la Q del circuito. Si se usa E_L, la ecuación $Q = E_L/E_R$ puede escribirse en esta forma: $Q = IX_L/IR$; entonces puede reducirse a la ecuación normal para Q

$$Q = X_L/R$$

En esta ecuación puede apreciarse que cuanto menor sea la resistencia mayor será la Q o calidad del circuito resonante.



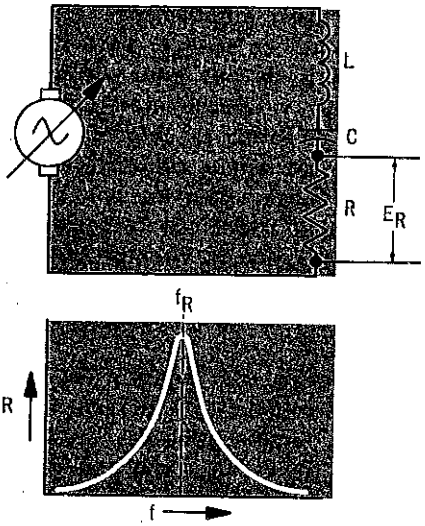
Nótese que la ecuación para la Q del circuito resonante LCR es la misma que se aprendió antes, en este mismo volumen para la Q de una bobina. Esto muestra por qué la resistencia c-c de una bobina es importante en circuitos resonantes

Un circuito con Q alta tiene una curva de resonancia alta, con pendiente pronunciada y, por lo tanto, una banda de paso angosta. Si se conoce la Q de un circuito, la banda de paso se puede calcular a partir de la siguiente ecuación

$$\text{Banda de paso (cps)} = f_R/Q$$

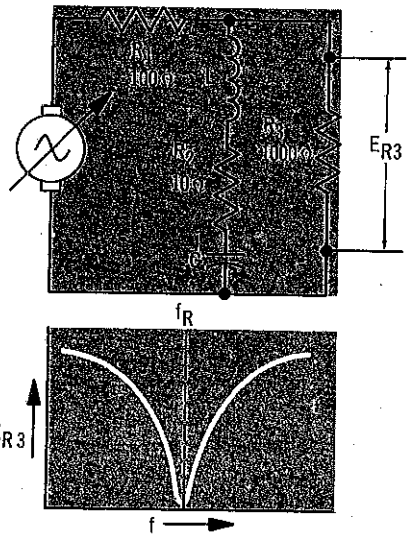
El resultado de la ecuación es el número total de ciclos por segundo que están por encima y por debajo del nivel de la frecuencia resonante y constituyen la banda de resonancia. Por ejemplo, si para una frecuencia resonante de 100 cps esta ecuación da un resultado de 10 cps, la banda de resonancia se extiende de 95 cps (100 − 5) a 105 cps (100 + 5)

aplicaciones prácticas (cont.)



En este circuito, la corriente en la resistencia I_R produce el voltaje de salida. En resonancia, X_L anula a X_C, de manera que la corriente del circuito, que también es I_R, es máxima. Arriba y abajo de la resonancia, la impedancia del circuito aumenta e I_R se reduce en forma abrupta. Así pues, solamente las frecuencias en resonancia o cerca de resonancia producen un voltaje de salida útil

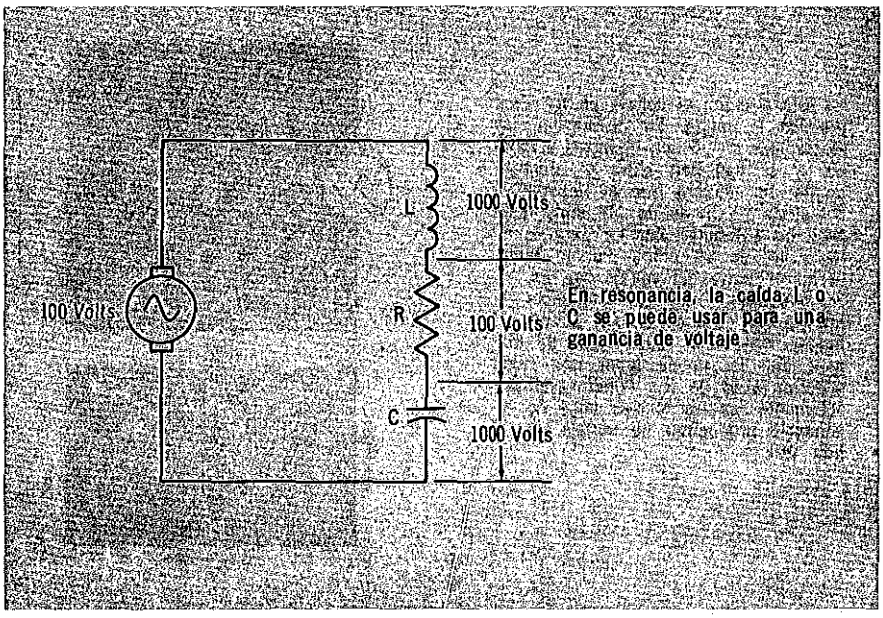
En este circuito, el voltaje en R_3, E_{R3}, produce la salida. En resonancia, las reactancias de LC son opuestas e iguales, y se cancelan entre sí efectivamente. De manera que la impedancia del circuito LCR es de 10 ohms. Esto hace las combinaciones en paralelo de R_2 y R_3 de 10 ohms. Por lo tanto, la mayor parte del voltaje cae en R_1. Sin embargo, fuera de resonancia, la impedancia el circuito LCR puede ser mucho mayor de 1000 ohms, de manera que R_3 puede tener una caída superior a la de R_1. Como resultado, solamente las frecuencias lejos de resonancia producirán un voltaje de salida útil



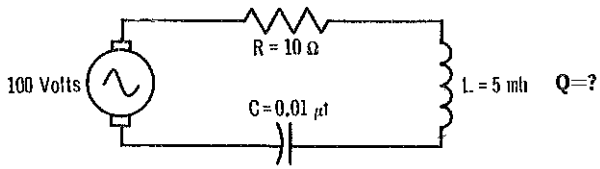
aplicaciones prácticas

En este punto cabe preguntarse si los circuitos resonantes en serie sirven para algo práctico. La respuesta es afirmativa: no solamente se usan en aplicaciones prácticas, sino que se usan ampliamente. Casi en todas las aplicaciones de los circuitos resonantes en serie se hace uso de la propiedad por la que éstos permiten el flujo de una gran corriente a frecuencias dentro de la banda de resonancia y ofrecen gran oposición al flujo de corriente a frecuencias fuera de la banda de resonancia. Por lo tanto, se usan debido a su capacidad de *discriminar* contrafrecuencias fuera de la banda de resonancia. Como se puede observar, una combinación en serie de inductancia, capacitancia y resistencia se puede conectar en un circuito de tal manera que haga que el circuito responda sólo a aquellas frecuencias dentro de la banda de resonancia. El funcionamiento de la combinación LCR es *idéntica* en ambos casos; pero su efecto en el circuito total es diferente.

Otra aplicación de los circuitos resonantes en serie consiste en lograr una *ganancia* de tensión. Se sabe que en resonancia, la tensión en X_L y X_C puede ser muchas veces mayor que la tensión aplicada. En ciertas aplicaciones, se usa la tensión, ya sea de X_L o de X_C, como una tensión de salida para efectuar alguna función. Puesto que tal tensión es mayor que la tensión aplicada —que es la tensión de entrada— se ha logrado una ganancia de tensión en el circuito.



problemas resueltos



Problema 26. ¿Cuál es la Q del circuito?

Mediante la ecuación $Q = X_L/R$, la Q se puede calcular a partir de la reactancia inductiva y la resistencia. O se puede obtener a partir de la caída de tensión en L o C y la caída en R mediante cualquiera de las siguientes ecuaciones: $Q = E_L/E_R$ ó $Q = E_C/E_R$. Sin embargo, independientemente del método que se use primero debe determinarse una de las reactancias; para esto, es necesario conocer la frecuencia de resonancia (f_R) del circuito. Dependiendo del método seleccionado para obtener Q, los cálculos que deben efectuarse son los siguientes:

Si se usa $Q = X_L/R$
1) determinar f_R
2) determinar X_L
3) determinar Q

Si se usa $Q = E_L/E_R$
1) determinar I
2) determinar f_R
3) determinar X_L
4) determinar E_L
5) determinar Q

Obsérvese en esta comparación que el problema se puede resolver más fácilmente de acuerdo con la ecuación $Q = X_L/R$.

Cálculo de la frecuencia resonante, f_R:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{0.005 \times 0.00000001}} = 22{,}500 \text{ cps} = 22.5 \text{ kc}$$

Cálculo de X_L: Ahora, el valor que debe calcularse es la reactancia inductiva a la frecuencia resonante (f_R):

$$X_L = 2\pi f_R L = 6.28 \times 22{,}500 \times 0.005 = 707 \text{ ohms}$$

Cálculo de Q:

$$Q = X_L/R = 707/10 = 70.7$$

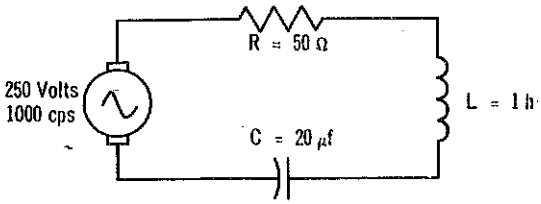
Problema 27. ¿Cuál es la anchura de banda del circuito?

Puesto que se conoce la Q del circuito, la anchura de banda se puede calcular fácilmente a partir de la ecuación:

$$\text{Banda de paso (cps)} = f_R/Q = 22{,}500/70.7 = 318 \text{ cps}$$

Esto significa que, desde el punto de vista práctico, el circuito se puede considerar resonante a frecuencias entre 22,341 y 22,659 cps.

problemas resueltos (cont.)



Problema 28. ¿Es inductivo el circuito o es capacitivo?

Un circuito es inductivo si X_L es mayor que X_C y capacitivo en caso contrario. De manera que este problema se puede resolver calculando X_L y X_C y comparándolas. Esto requeriría hacer dos cálculos por separado. El problema se puede resolver haciendo sólo un cálculo si se recuerda que el circuito es capacitivo cuando la frecuencia de un circuito en serie LCR está debajo de la frecuencia resonante, y que es inductivo si la frecuencia es superior a la resonante. Así pues, todo lo que se requiere es calcular la frecuencia resonante y compararla con la frecuencia del circuito. Por lo tanto, la frecuencia resonante es

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{1 \times 0.00002}} = \frac{1}{0.028} = 38 \text{ cps}$$

La frecuencia del circuito, de 1,000 cps es mayor que la frecuencia resonante de 38 cps, de manera que el circuito es *inductivo.*

Problema 29. ¿Cuál es la corriente del circuito?

La corriente se determina por medio de los mismos métodos que se aplican a cualquier circuito en serie LCR. Esto significa que primero deben determinarse X_L y X_C, luego la impedancia Z y finalmente la corriente, con la ecuación $I = E/Z$.

Cálculo de X_L y X_C:

$$X_L = 2\pi fL = 6.28 \times 1{,}000 \times 1 = 6{,}280 \text{ ohms}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 1{,}000 \times 0.00002} = 8 \text{ ohms}$$

Cálculo de Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(50)^2 + (6{,}280 - 8)^2} = 6{,}272 \text{ ohms}$$

Note que la impedancia tiene casi exactamente el mismo valor que X_L. La razón es que X_L es mucho mayor que X_C, de manera que el efecto de X_C es despreciable. En la práctica, si X_L es más de 10 veces mayor que X_C, de hecho se puede hacer caso omiso del valor de X_C y la impedancia considerarla igual a X_L.

Cálculo de I:

$$I = E/Z = 250 \text{ volts}/6{,}272 \text{ ohms} = 0.040 \text{ ampere}$$

resumen

☐ La resonancia en serie de un circuito en serie LCR ocurre a la frecuencia donde la reactancia neta es cero. ☐ En resonancia, la impedancia es mínima y la corriente, máxima. ☐ La frecuencia resonante es $f_R = 1/(2\pi\sqrt{LC})$. ☐ En resonancia, el circuito en serie LCR es completamente resistivo. ☐ En valores superiores al de la resonancia, X_L es mayor que X_C y el circuito es inductivo. ☐ En valores inferiores al de resonancia; X_C es mayor que X_L y el circuito es capacitivo. ☐ La curva de resonancia indica valores de corriente a diferentes frecuencias.

☐ La banda de paso de un circuito en serie LCR es el rango de frecuencias entre las cuales la corriente del circuito es 0.707, o mayor, de sus valores en resonancia. ☐ La banda de resonancia o banda de paso de un circuito también se llama anchura de banda. ☐ La resistencia de un circuito en serie LCR influye en el grado de achatamiento de la banda de paso. Cuanto mayor sea la resistencia, más ancha será la banda de paso; cuanto menor sea la resistencia, más angosta será la banda de paso.

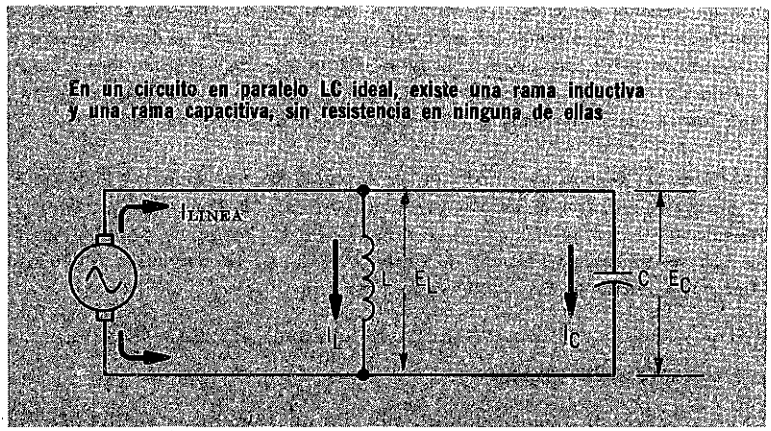
☐ La Q de un circuito es la relación de la caída de tensión en el inductor o el capacitor en resonancia, con la tensión en el resistor. $Q = E_L/E_R = E_C/E_R$. Otras ecuaciones para calcular Q son $Q = X_L/R$ y $Q = X_C/R$. ☐ La banda de paso de un circuito en serie LCR se obtiene por: banda de paso $= f_R/Q$. ☐ La desviación arriba y abajo de la frecuencia resonante es ½ banda de paso.

preguntas de repaso

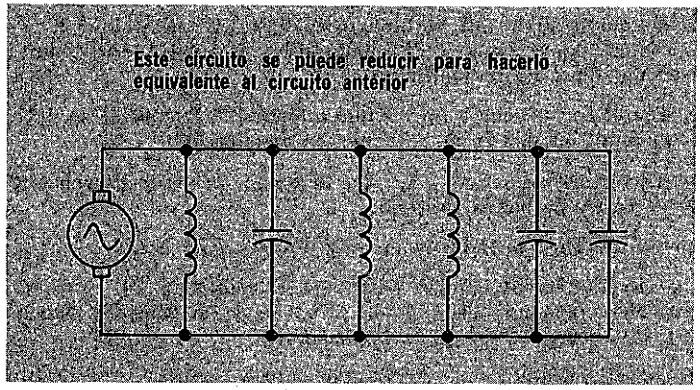
1. ¿Cuál es la frecuencia resonante de un circuito en serie LCR cuya L es de 15 h, una C de 15 f, y una R de 10 ohms?
2. Para el circuito de la pregunta 1 ¿cuál es el valor de Q?
3. Escriba la ecuación para la banda de paso de un circuito en serie LCR en función de la resistencia y la inductancia (*recomendación*: substituya a Q en la ecuación de la banda de paso).
4. ¿Cuál es la anchura de banda de un circuito en serie LCR si R es igual a 6.28 ohms y L igual a 50 milihenrys?
5. ¿Cuál es el factor de potencia para un circuito resonante en serie?
6. Si se aplican 50 volts a un circuito en serie LCR en el que R es igual a 5 ohms, X_L es igual a 23.2 ohms y X_C es igual a 49.6 ohms, ¿qué corriente fluirá en resonancia?
7. Si se aplican 50 volts a un circuito en serie LCR cuya Q es 10, ¿cuál es la tensión aplicada al capacitor en resonancia?
8. En un circuito en serie LCR, ¿qué determina el grado de achatamiento de la curva de banda de paso?
9. En resonancia, ¿es inductivo un circuito en serie LCR?
10. Un circuito en serie LCR tiene una corriente de 20 amperes a su frecuencia resonante de 100 kc. ¿Cuál es la anchura de banda si a 104 kc la corriente es de 14.14 amperes?

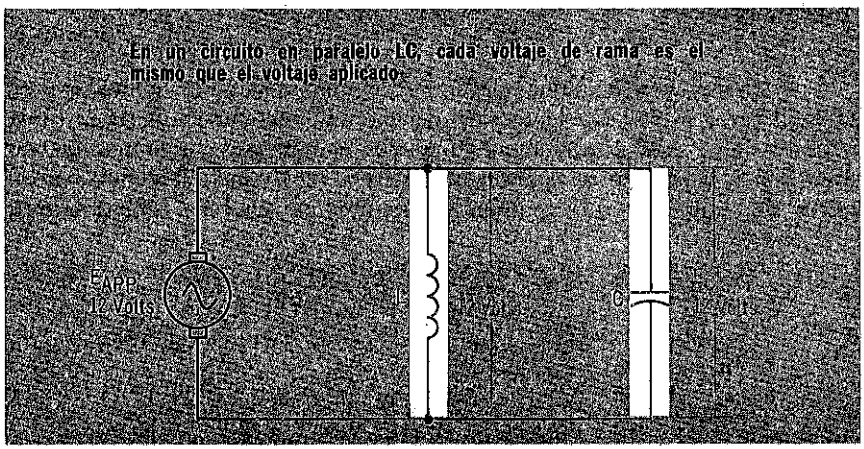
circuitos en paralelo LC

Un circuito en paralelo LC consta de una inductancia y una capacitancia conectadas en paralelo a una fuente de tensión. Por lo tanto, el circuito tiene dos ramas: una *rama inductiva* y una *rama capacitiva*. En un circuito en paralelo *ideal*, que se considerará aquí, *no hay resistencia* en ninguna de las ramas. Naturalmente, esto es imposible, pero en la práctica, la resistencia puede ser tan pequeña, que se haga caso omiso de ella.



Los circuitos en paralelo LC pueden tener más de una rama inductiva o capacitiva, o más de una de cada una de ellas. Sin embargo, una vez que estos circuitos se reducen a su equivalente de dos ramas, su análisis es el mismo que el de un circuito en paralelo LC simple.

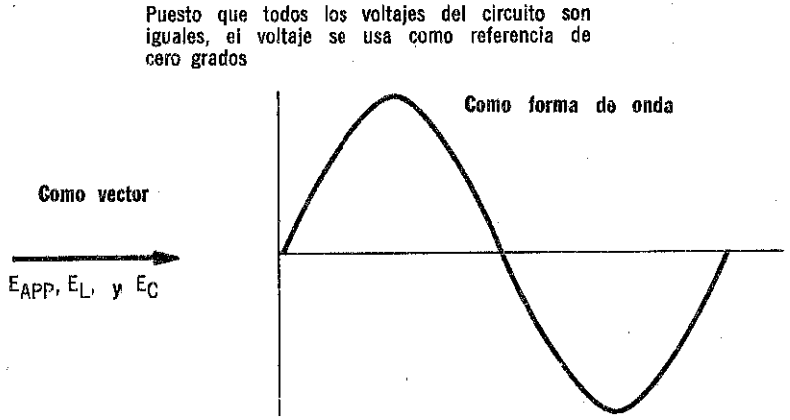




tensión

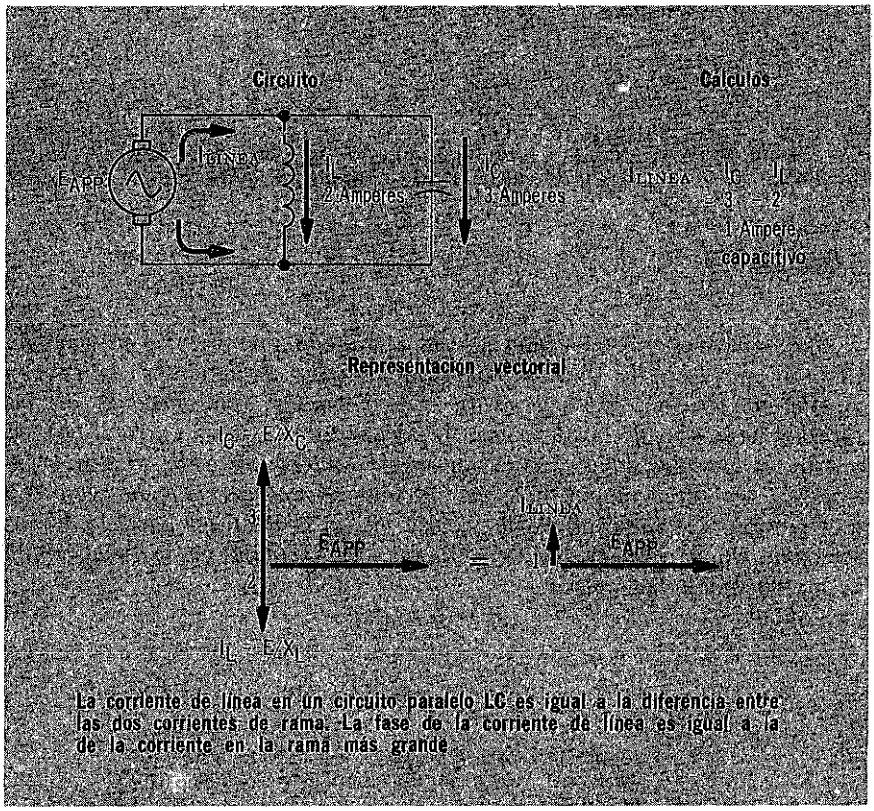
Las tensiones en cada una de las ramas de un circuito en paralelo LC son iguales a la tensión aplicada, ya que son circuitos en paralelo. Puesto que en realidad es *la misma* tensión, las tensiones en las ramas y la tensión de la fuente son iguales entre sí y están en fase. Debido a esto, la tensión se usa como *referencia de fase* de cero grados y las fases de las otras magnitudes del circuito se expresan en relación con esta tensión. La amplitud de la tensión en un circuito en paralelo LC se relaciona con la impedancia del circuito y la corriente en la línea, según la ley de Ohm. Así, pues,

$$E = I_{LINEA}Z$$



corriente

Las corrientes en las ramas de un circuito en paralelo LC están, *ambas*, defasadas con respecto a la tensión del circuito. La corriente en la rama inductiva (I_L) está atrasada en 90 grados con respecto a la tensión, en tanto que la corriente en la rama capacitiva (I_C) está adelantada en 90 grados con respecto a la tensión. La tensión es igual en ambas ramas;



La corriente de línea en un circuito paralelo LC es igual a la diferencia entre las dos corrientes de rama. La fase de la corriente de línea es igual a la de la corriente en la rama más grande.

por lo tanto, las corrientes I_L e I_C están defasadas 180 grados. Las amplitudes de las corrientes en las ramas dependen del valor de la reactancia en las ramas respectivas y se pueden determinar a partir de:

$$I_L = E/X_L$$

e

$$I_C = E/X_C$$

Con las corrientes en las ramas defasadas 180 grados, la corriente en la línea es igual a su suma vectorial. Esta suma vectorial se efectúa restando la corriente de la rama más pequeña, de la mayor.

corriente (cont.)

Por lo tanto, la corriente en la línea para un circuito en paralelo LC tiene las *características de fase* de la corriente de rama *mayor*. Así, pues, si la corriente en la rama inductiva es la mayor, la corriente en la línea es inductiva y estará atrasada 90 grados con respecto a la tensión aplicada. Y si la corriente en la rama capacitiva es la mayor, la corriente en la línea es capacitiva y estará adelantada 90 grados con respecto a la tensión aplicada. Por lo tanto, en forma de ecuación, la corriente de línea es la siguiente:

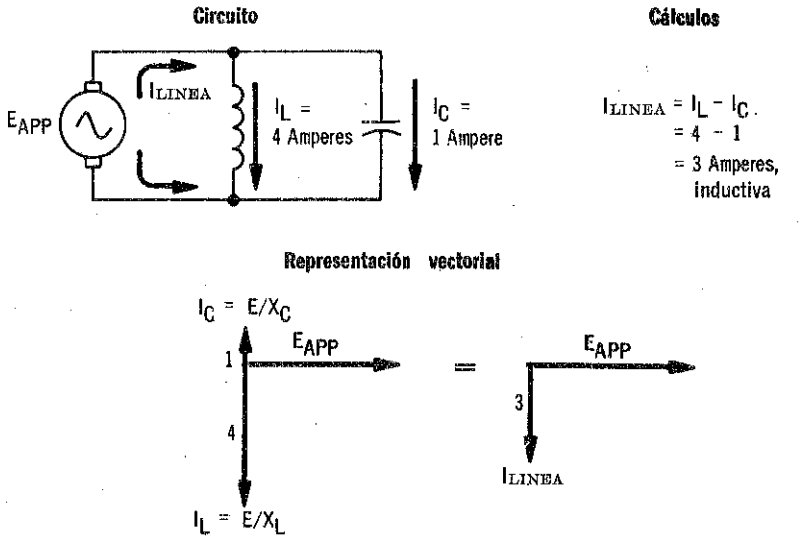
$$I_{LINEA} = I_L - I_C \text{ (si } I_L \text{ es mayor que } I_C)$$

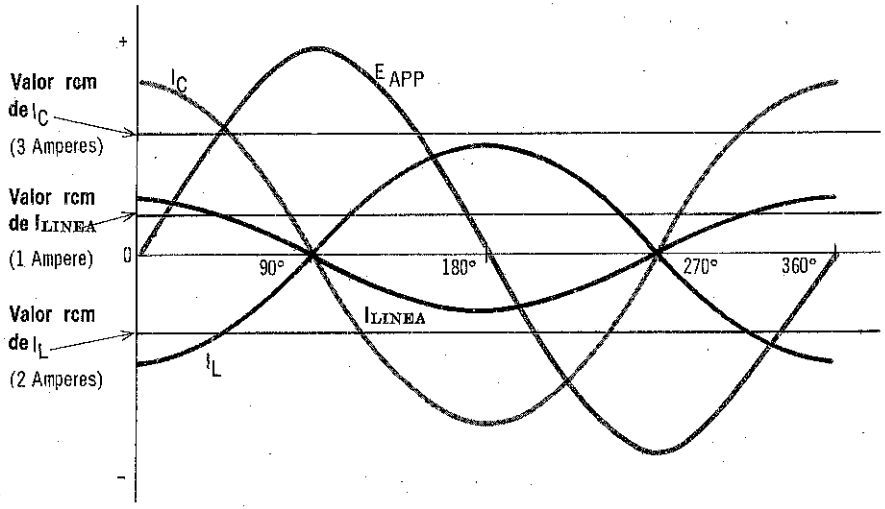
$$I_{LINEA} = I_C - I_L \text{ (si } I_C \text{ es mayor que } I_L)$$

Si se ignora la impedancia de circuito, la corriente en la línea también puede determinarse según la ley de Ohm:

$$I_{LINEA} = E/Z$$

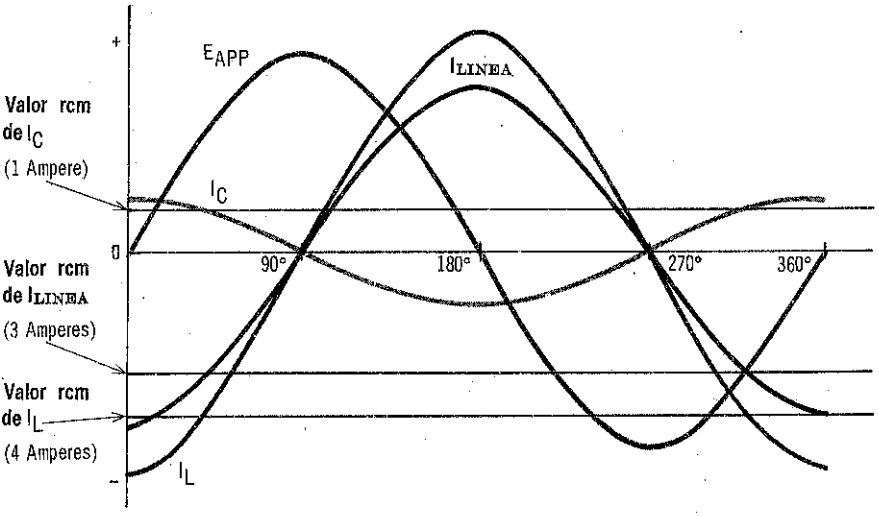
Una propiedad específica de la corriente en la línea de un circuito en paralelo LC es que siempre es *menor* que la de una de las corrientes de ramas y algunas veces, menor que ambas. Esto contrasta con todos los demás circuitos en paralelo que se han estudiado, en los cuales la corriente en la línea siempre era mayor que cualquiera de las corrientes de rama. La razón por la cual la corriente de línea es menor que las corrientes de rama es que las dos corrientes de rama están defasadas 180 grados. Como resultado de la diferencia de fase, cuando se combinan para producir la corriente en la línea, tiene lugar cierta *anulación* entre ambas corrientes. Más tarde se observará que esta propiedad es la base de la *resonancia en paralelo*.





ondas de corriente

Las ondas de las corrientes en circuitos en paralelo LC son similares a las ondas de tensión que se han estudiado para un circuito en serie LC. Todos los valores instantáneos de dos ondas defasadas 180 grados, se suman para producir la onda resultante que, en este caso, es la de la corriente de línea. En las ilustraciones se pueden apreciar las ondas de corriente de los dos circuitos resueltos en las páginas anteriores.



impedancia

La impedancia de un circuito en paralelo LC se determina de la manera siguiente:

$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L - X_C} \qquad \text{(para } X_L \text{ mayor que } X_C\text{)}$$

y

$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L} \qquad \text{(para } X_C \text{ mayor que } X_L\text{)}$$

Cuando se aplican estas ecuaciones, la impedancia tendrá la característica de fase de la reactancia *más baja.*

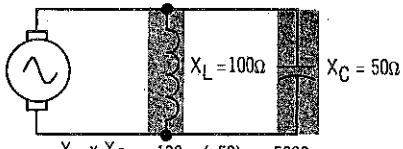
Por sencillez matemática, se puede usar una sola ecuación para encontrar Z, independientemente de cuál de las reactancias X_L o X_C sea mayor:

$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C}$$

Esta es la misma ecuación que se empleaba para calcular resistencias en paralelo; pero, puesto que X_L y X_C están defasadas 180 grados, para usar esta ecuación X_L siempre es una cantidad positiva (+) y X_C es siempre una cantidad negativa (−). Cuando los *valores relativos* de X_L y X_C dan una Z *negativa*, la impedancia es *capacitiva.* En forma similar, cuando Z es *positiva* la impedancia es *inductiva.* Téngase presente que, en realidad, X_C no es una cantidad negativa. Se supone así sólo para esta ecuación de impedancia.

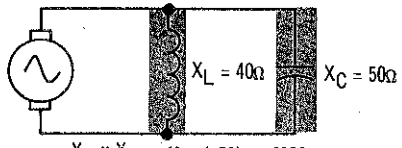
La impedancia de un circuito LC en paralelo es $Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C}$

Cuando se usa esta ecuación, X_L siempre es positiva (+) y X_C siempre es negativa (−)



$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C} = \frac{100 \times (-50)}{100 + (-50)} = \frac{-5000}{50}$$

Z = − 100 Ω; tanto Z como I_{LINEA} son, por lo tanto, capacitivas



$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C} = \frac{40 \times (-50)}{40 + (-50)} = \frac{-2000}{-10}$$

Z = 200 Ω; tanto Z como I_{LINEA} son, por lo tanto, inductivas

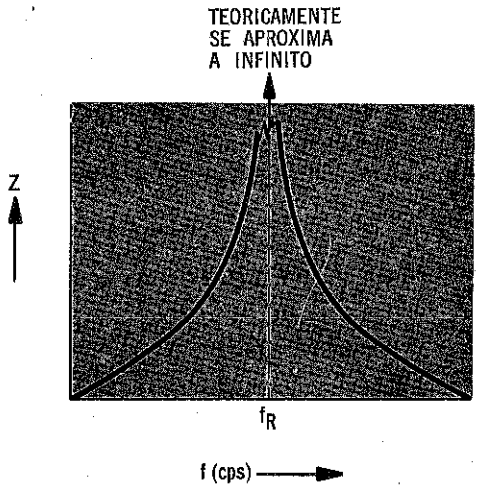
Obsérvese que, debido a la diferencia de signo, cuanto más próximos se hallen los valores de X_L y X_C, *mayor será* la impedancia. Cuando X_L y X_C son iguales, la impedancia es infinita. Según se estudiará más tarde, el circuito está entonces en resonancia.

Si se conocen la corriente en la línea y la tensión aplicada también puede determinarse la impedancia, mediante la ley de Ohm:

$$Z = E_{AP}/I_{LINEA}$$

efecto de la frecuencia

La frecuencia de la tensión aplicada afecta a los valores de X_L y X_C en un circuito en paralelo LC. Puesto que el valor de la impedancia se basa en X_L y X_C, la frecuencia afecta también a la impedancia. No obstante, como X_L y X_C cambian en direcciones *opuestas* para un cambio dado de frecuencia, no se pueden establecer relaciones generales para los efectos de la frecuencia sobre la impedancia, como se hizo en los circuitos RL y RC. Sin embargo, según se ha mencionado antes en circuitos en serie LC para cada combinación de inductancia y capacitancia, existe una frecuencia, llamada *frecuencia resonante*, para la cual el valor de X_L es *igual* al de X_C. Además, como se ha visto en la página anterior, cuando X_L y X_C son iguales en un circuito en paralelo LC, la impedancia tiende a un valor infinitamente grande. En frecuencias mayores y menores que esta frecuencia resonante, X_L y X_C tienen diferentes valores, y la impedancia es menor.

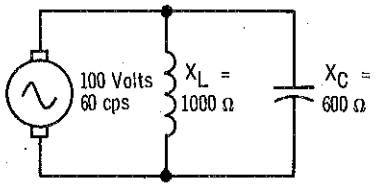


La curva de respuesta de frecuencia de un circuito en paralelo LC se asemejaría a esto. La impedancia alta o infinita en la curva, se presenta a la frecuencia resonante

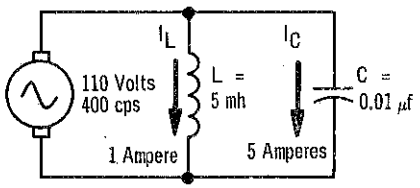
Si la frecuencia cambia de este punto, la impedancia disminuye. Y si la frecuencia cambia hacia este punto, la impedancia aumenta

Por lo tanto, puede decirse que en circuitos en paralelo LC, un cambio en frecuencia *hacia* la frecuencia resonante, ocasionará *aumento de impedancia* y *disminución de la corriente de línea*. En forma similar, un cambio de frecuencia alejándose de la frecuencia resonante ocasiona una *disminución de impedancia y aumento de la corriente en la línea.*

problemas resueltos



Problema 30



Problema 31

Problema 30. ¿Cuál es la corriente de línea en el circuito?

El problema se puede resolver de dos maneras. Una es determinar las corrientes en las dos ramas y luego aprovecharlas para calcular la corriente en la línea. La otra es determinar la impedancia y luego aplicar la ley de Ohm para obtener la corriente en la línea. Ambos métodos son igualmente adecuados, de manera que el problema se resolverá de las dos maneras:

Cálculo de I_{LINEA} por el método de las corrientes de rama:

$$I_L = E_{AP}/X_L = 100/1{,}000 = 0.1 \text{ ampere}$$
$$I_C = E_{AP}/X_C = 100/600 = 0.166 \text{ ampere}$$

Puesto que I_C es mayor que I_L, la ecuación para I_{LINEA} es

$$I_{LINEA} = I_C - I_L = 0.166 - 0.1 = 0.066 \text{ ampere}$$

I_C era la mayor corriente de rama, de manera que la corriente en la línea de 0.066 ampere es capacitiva, lo que significa que está adelantada 90 grados respecto a la tensión aplicada.

Cálculo de I_{LINEA} por el método de impedancia:

$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C} = \frac{1{,}000 \times (-600)}{1{,}000 + (-600)} = -1{,}500 \text{ ohms, capacitiva}$$

Por lo tanto, la corriente en la línea es

$$I_{LINEA} = 100/1{,}500 = 0.066 \text{ ampere}$$

Puesto que la impedancia era negativa, la corriente en la línea es capacitiva por lo que estará adelantada 90 grados con respecto a la tensión.

Problema 31. En el circuito, ¿cuál es mayor, X_L o X_C?

Este problema se podría resolver calculando los valores de X_L y X_C y comparándolos. Pero, puesto que sólo es necesario determinar cuál es la mayor, el problema se puede resolver con sólo analizarlo. Las tensiones en ambas ramas son iguales, de manera que la reactancia más grande permitirá el paso de la menor corriente. Puesto que I_L (1 ampere) es menor que I_C (5 amperes), X_L debe ser mayor que X_C.

resumen

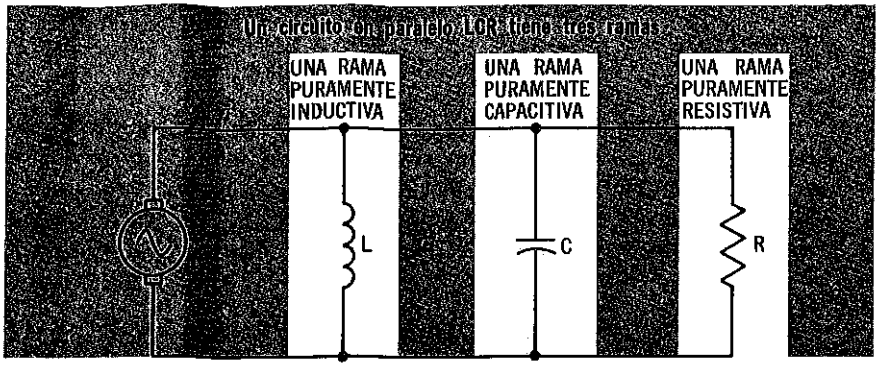
☐ Debido a que la tensión es igual en cada rama de un circuito en paralelo LC, la tensión se usa como referencia de fase. ☐ La corriente en la rama inductiva se determina por medio de la expresión: $I_L = E/X_L$, y la corriente en la rama capacitiva según: $I_C = E/X_C$. ☐ La corriente en la línea tiene las mismas características que la mayor corriente de rama y es igual en magnitud a la diferencia de las dos corrientes: $I_{LINEA} = I_L - I_C$, si I_L es mayor que I_C; e $I_{LINEA} = I_C - I_L$, para I_C mayor que I_L. ☐ La corriente de línea se puede obtener también mediante la ley de Ohm: $I_{LINEA} = E/Z$.

☐ La impedancia de un circuito en paralelo LC es $Z = X_L X_C/(X_L - X_C)$, para X_L mayor que X_C; o $Z = X_L X_C/(X_C - X_L)$, para X_C mayor que X_L. ☐ El circuito en paralelo LC puede ser capacitivo o inductivo, dependiendo de cuál de las dos reactancias en paralelo sea menor. ☐ La impedancia en un circuito paralelo LC también se puede determinar por la expresión: $Z = X_L X_C/(X_L + X_C)$. Cuando se usa esta ecuación, X_C siempre tiene signo negativo (−). Y el signo resultante de Z determina si la impedancia es inductiva (+) o capacitiva (−).

☐ A la frecuencia resonante, donde X_L es igual a X_C, la impedancia se aproxima a un valor infinitamente grande. ☐ A frecuencias mayores y menores que la frecuencia resonante, X_L y X_C tienen valores diferentes y la impedancia es menor que en resonancia. ☐ En resonancia, la corriente de línea en un circuito en paralelo LC será mínima y aumentará al cambiar la frecuencia arriba y abajo de la resonancia.

preguntas de repaso

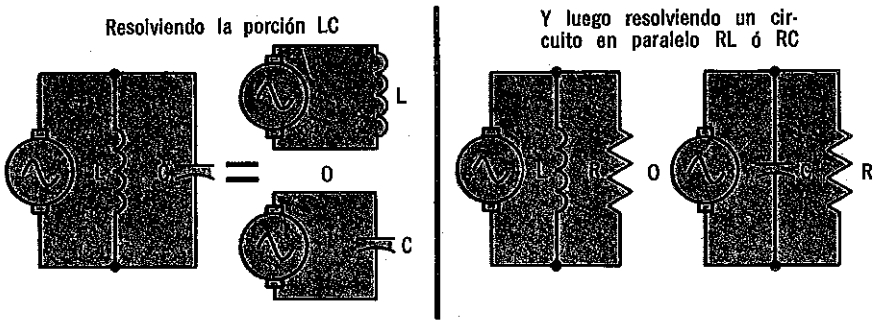
1. La corriente en la línea de un circuito en paralelo LC es de 20 amperes, y la corriente en el inductor, es de 30 amperes. ¿Cuánta corriente fluye en el capacitor?
2. Si la corriente en el inductor de la pregunta 1 es de 15 amperes, ¿cuánta corriente fluye en el capacitor?
3. ¿Cuánto vale Z para un circuito en paralelo LC, cuando X_L es 20 ohms, y X_C es 10 ohms?
4. Responda la pregunta 3, intercambiando los valores de X_L y X_C.
5. ¿Es inductivo o capacitivo el circuito de la pregunta 3?
6. ¿Es inductivo o capacitivo el circuito de la pregunta 4?
7. ¿Puede ser mayor la corriente en la línea que una o ambas corrientes de rama en un circuito en paralelo LC?
8. ¿A qué frecuencia tiende un circuito paralelo ideal LC a las características de un circuito abierto?
9. ¿Cuál es la corriente en la línea para el circuito de la pregunta 8?
10. Si en un circuito en paralelo LC, aumenta la frecuencia a valores superiores al de la frecuencia resonante, ¿ocasionará esto que el circuito se vuelva más capacitivo, o más inductivo?



circuitos en paralelo LCR

Un circuito en paralelo LCR es esencialmente un circuito en paralelo LC con una resistencia en paralelo con la inductancia y capacitancia. De esta manera, se tienen *tres ramales* en el circuito: Una rama exclusivamente inductiva, una rama puramente capacitiva y una rama exclusivamente resistiva. Ya se ha estudiado la forma de analizar y calcular circuitos en paralelo que contengan cualesquiera de estas dos ramas. Ahora se analizarán circuitos que contengan las tres.

Cuando se resuelven problemas de circuitos LCR en paralelo, esencialmente se está:

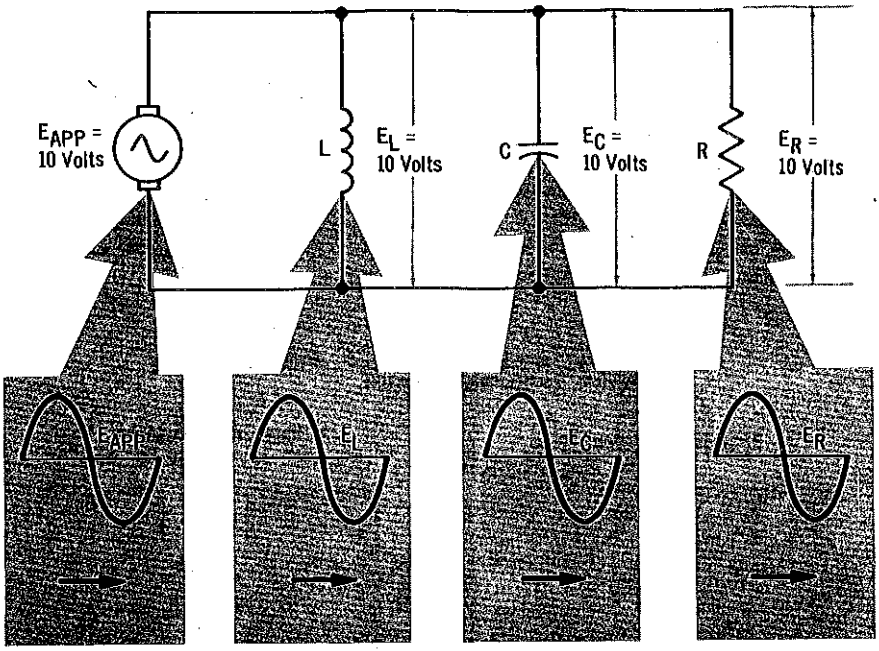


En realidad, se encontrará que la forma de calcular un circuito en paralelo consiste básicamente en, primero, calcular un circuito en paralelo LC y luego un circuito en paralelo RL, o bien un circuito en paralelo RC. La razón es que, según se recordará de lo visto en páginas anteriores, el efecto que tiene en la fuente una combinación en paralelo de L y C es el mismo que si fuera una L pura o una C pura. Así, pues, al resolver primeramente la parte LC del circuito en paralelo LCR, efectivamente se reduce el circuito a un circuito equivalente RL o RC.

tensión

La distribución de la tensión en un circuito en paralelo LCR no difiere de la que se observa en un circuito en paralelo LC o en cualquier circuito en paralelo. Todas las tensiones en las ramas son *iguales* y están *en fase*, ya que son iguales a la tensión aplicada. La resistencia es simplemente otra rama conectada a la cual se aplica la misma tensión. Debido

En un circuito paralelo LCR, el voltaje de cada rama es el mismo que el voltaje aplicado



Puesto que los voltajes del circuito son todas iguales, el voltaje se usa como referencia de fase de cero grados

a que las tensiones en todos los circuitos son iguales, nuevamente se usa la tensión aplicada como *referencia de fase* de cero grados, como se hizo en circuitos en paralelo LC. Por lo tanto, los ángulos de fase de todas las demás magnitudes del circuito se expresan en relación con la tensión aplicada. La amplitud de la tensión aplicada se relaciona con la impedancia del circuito, según la ley de Ohm:

$$E_{AP} = I_{LINEA}Z$$

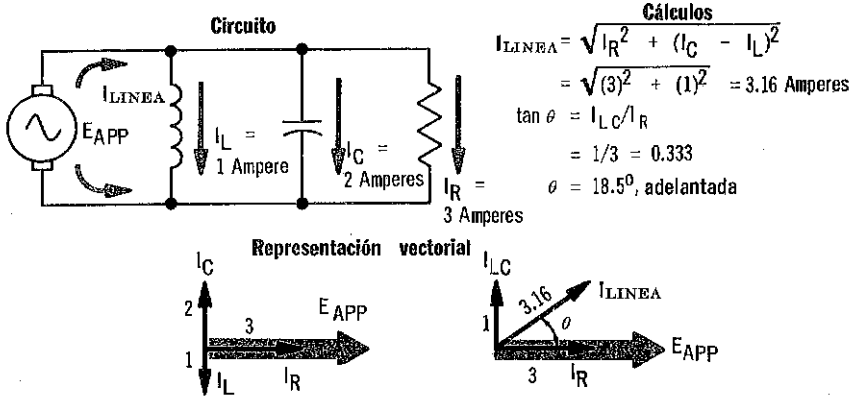
corriente

Las tres corrientes de rama en un circuito en paralelo LCR son una *corriente inductiva* (I_L), una *corriente capacitiva* (I_C) y *una corriente resistiva* (I_R). Cada una de ellas es independiente de la otra y depende solamente de la tensión aplicada y de la resistencia o reactancia de la rama. Las amplitudes de las corrientes de rama son iguales a:

$$I_L = E_{AP}/X_L \qquad I_C = E_{AP}/X_C \qquad I_R = E_{AP}/R \ .$$

Las tres corrientes de rama tienen fases *diferentes* con respecto a las tensiones de la rama. I_L estará atrasada 90 grados con respecto a la tensión; I_C estará adelantada 90 grados respecto a la tensión e I_R estará en fase con la tensión. Puesto que las tensiones iguales entre sí I_L e I_C están 180 grados fuera de fase entre sí y ambas 90 grados defasadas respecto a I_R. Como I_R está en fase con la tensión, tiene la misma dirección de referencia 0 que la tensión. Así pues, I_C está adelantada 90 grados con respecto a I_R e I_L está atrasada 90 grados con respecto a I_R.

La corriente de línea en un circuito en paralelo LCR es igual a la SUMA VECTORIAL de las tres corrientes ramales



La rama reactiva que tiene la corriente más alta determina si la corriente de línea está adelantada o atrasada con respecto al voltaje aplicado. Las amplitudes relativas de las corrientes reactiva y resistiva totales determinan entonces el ángulo de adelanto o atraso

La corriente en la línea (I_{LINEA}) es la suma vectorial de las tres corrientes de rama, de manera que puede calcularse sumando I_L, I_C e I_R vectorialmente. Las relaciones de fases diferentes entre las tres corrientes de rama hacen necesario que esta suma se efectúe en dos pasos. Antes que nada se suman las dos corrientes reactivas, según los mismos métodos que se aplicaron en circuitos LC. Entonces, el total de las corrientes, llamada I_{LC}, es

$$I_{LC} = I_L - I_C \qquad \text{(si } I_L \text{ es mayor que } I_C\text{)}$$
$$I_{LC} = I_C - I_L \qquad \text{(si } I_C \text{ es mayor que } I_L\text{)}$$

corriente (cont.)

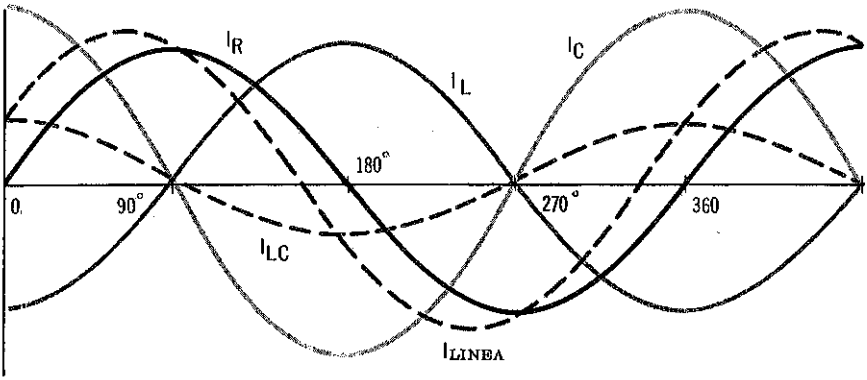
Para determinar la corriente en la línea, se suma la cantidad I_{LC} a I_R, mediante el teorema de Pitágoras. Por lo tanto,

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_{LC}^2}$$

Cuando se combinan las ecuaciones de estas dos adiciones, se obtiene la ecuación normal para calcular corriente de línea en función de las corrientes de rama. Esto es,

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \qquad \text{(si } I_L \text{ es mayor que } I_C\text{)}$$

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \qquad \text{(si } I_C \text{ es mayor que } I_L\text{)}$$



Para encontrar la corriente de línea (I_{LINEA}) primeramente se suma la corriente inductiva (I_L) la corriente capacitiva (I_C) algebraicamente, para encontrar la corriente reactiva total (I_{LC}). Luego se usa el teorema de Pitágoras con I_{LC} y la corriente resistiva, I_R

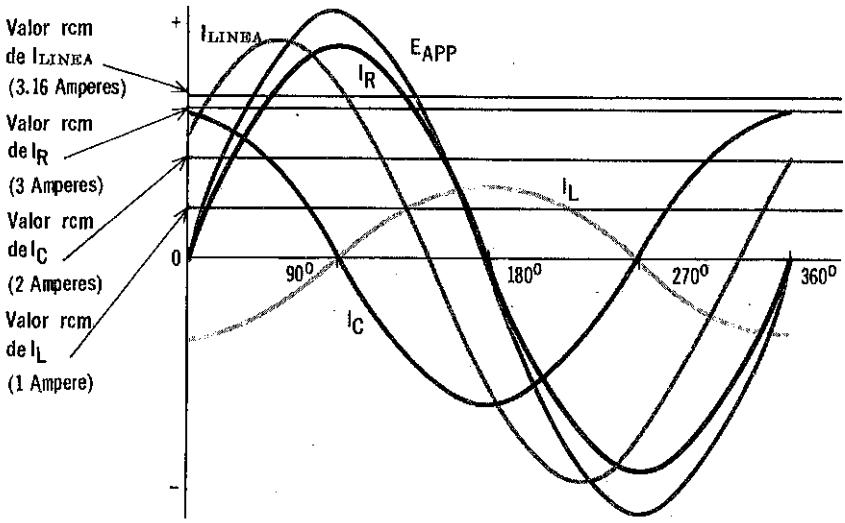
El que la corriente en la línea esté adelantada o atrasada con respecto a la tensión aplicada, depende de cuál de las corrientes reactivas de rama, I_L o I_C, sea la *mayor*. Si I_L es *mayor*, I_{LINEA} estará *atrasada* con respecto a la tensión aplicada; y si I_C es la *mayor*, I_{LINEA} estará *adelantada* con respecto a la tensión aplicada. El ángulo exacto de adelanto o atraso se obtiene según la siguiente ecuación:

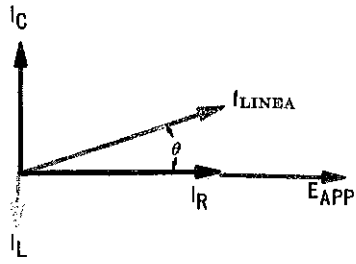
$$\tan \theta = I_{LC}/I_R$$

Que el ángulo sea de adelanto o atraso, es algo que depende de cuál de las corrientes de rama, I_L o I_C, sea mayor.

ondas de corriente

Las ondas de las corrientes en un circuito en paralelo LCR son similares a las ondas de las tensiones en un circuito de LCR. Los valores instantáneos de tres ondas defasadas se combinan para formar una onda resultante que, en este caso, es la corriente de línea del circuito. Dos de las ondas están defasadas 180 grados, de manera que sus valores instantáneos siempre son de polaridad opuesta. La tercera onda está defasada 90 grados respecto a las otras dos, pero en fase con la onda de tensión aplicada. En la figura aparecen ondas representativas de un circuito en paralelo LCR.





Este es un diagrama vectorial que corresponde a las formas de onda

impedancia

Para determinar la impedancia de un circuito paralelo LCR, primero debe obtenerse la reactancia neta (X) de las ramas inductiva y capacitiva. Luego, usando X, se puede determinar la impedancia (Z), de la misma manera que se haría en un circuito en paralelo RL o RC:

$$X = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C}$$

$$Z = \frac{XR}{\sqrt{X^2 + R^2}}$$

Recuérdese que X_L es una cantidad positiva y X_C es negativa. Así, pues, tanto X como Z también serán negativas (capacitiva) o positivas (inductiva).

La impedancia de un circuito en paralelo LCR:

$$Z = \frac{X \times R}{\sqrt{X^2 + R^2}} \quad \text{o} \quad Z = E_{APP} / I_{LINEA}$$

donde $X = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C}$

Cálculos $X = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C}$

$$= \frac{10 \times (-5)}{10 + (-5)} = -10$$

$$Z = \frac{X \times R}{\sqrt{X^2 + R^2}}$$

$$= \frac{10 \times 20}{\sqrt{(10)^2 + (20)^2}} = \frac{200}{22.4}$$

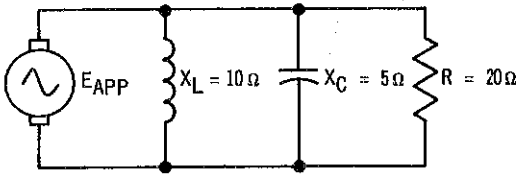
$$= 9 \text{ Ohms, capacitiva}$$

$\tan \theta = R/X$

$= 20/10 = 2$

$\theta = 63.4°$

Circuito



La corriente en este circuito es capacitiva debido a que la reactancia neta es capacitiva; esto a su vez hace capacitiva a la impedancia

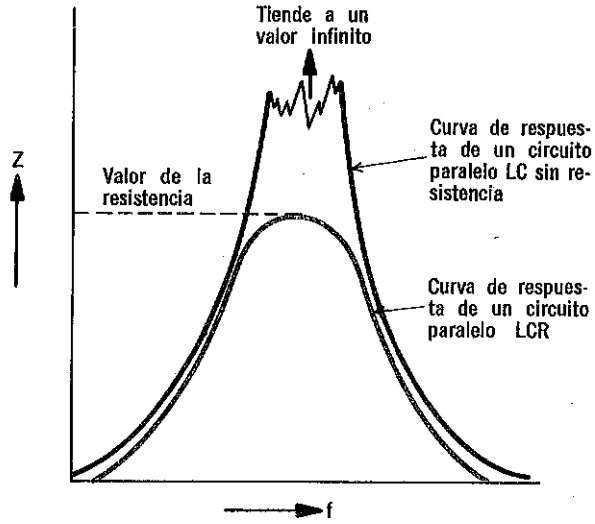
Siempre que Z sea inductiva, la corriente en la línea estará atrasada con respecto a la tensión aplicada. En forma similar, cuando Z es capacitiva, la corriente en la línea estará adelantada con respecto a la tensión aplicada. El ángulo exacto de adelanto o atraso depende de los valores relativos de X y R y se puede obtener mediante las siguientes ecuaciones:

$$\tan \theta = R/X \qquad \text{ó} \qquad \cos \theta = Z/R$$

También en este caso se aplica la regla de 10 a 1, dada para los otros circuitos.

Si se conocen la corriente en la línea y la tensión aplicada también puede determinarse la impedancia gracias a la ley de Ohm:

$$Z = E_{AP}/I_{LINEA}$$



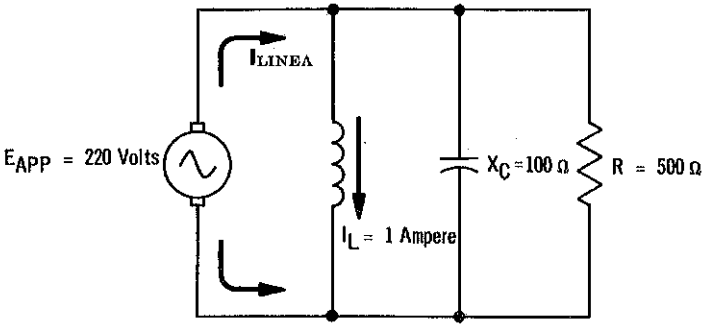
La impedancia de un circuito paralelo LCR nunca puede ser mayor que la resistencia, independientemente de qué tanto se aproximen la frecuencia resonante y la del circuito

efecto de la frecuencia

Los efectos que tiene la frecuencia sobre circuitos en paralelo LCR son similares a los que tiene en circuitos en paralelo LC. Un cambio en la frecuencia ocasiona cambios en los valores tanto de X_L como de X_C, pero en direcciones *diferentes*. Esto tiene como resultado un cambio en la impedancia de circuito. Sin embargo, la manera exacta en que cambia la impedancia depende de los *valores relativos* de X_L y X_C.

Una relación definida entre la frecuencia y la impedancia sólo puede establecerse con relación a la *frecuencia resonante* que, según se recordará, es la frecuencia que resulta cuando X_L y X_C son iguales. Dicha relación consiste en que todo cambio de frecuencia *hacia* la frecuencia *resonante*, produce un *aumento* en la impedancia; en tanto que un cambio de frecuencia que se *aleje* de la frecuencia *resonante*, tiene como resultado una *disminución* de la impedancia. Esta relación es la misma que existe en un circuito en paralelo LC. Sin embargo, se observa una diferencia importante. Teóricamente, en un circuito LC no hay límite al valor que pueda alcanzar la impedancia conforme la frecuencia se aproxima al valor resonante. Pero en un circuito LCR, la impedancia *nunca* puede ser mayor que el valor de la resistencia. En efecto, la resistencia anula una característica importante de la inductancia y la capacitancia en paralelo: la capacidad de presentar una impedancia muy alta a la fuente de tensión. Esto se estudiará posteriormente.

problemas resueltos



Problema 32. ¿Cuál es la corriente de línea en el circuito?

Este problema se puede resolver de dos maneras. Una es determinar todas las corrientes de rama y usarlas para calcular la corriente de línea. La otra es aplicar la ecuación $X_L = E_{AP}/I_L$ para obtener la reactancia de la rama inductiva y luego calcular la impedancia de circuito y a partir de ella determinar la corriente en la línea. En este caso se utilizarán las corrientes de rama para determinar I_{LINEA}.

Cálculo de I_C e I_R: como I_L está dada, sólo es necesario obtener I_C e I_R.

$$I_C = E_{AP}/X_C = 220/100 = 2.2 \text{ amperes}$$
$$I_R = E_{AP}/R = 220/500 = 0.44 \text{ ampere}$$

Cálculo de I_{LINEA}:

$$I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{(0.44)^2 + (1.2)^2} = 1.3 \text{ amperes}$$

La corriente está adelantada con respecto a la tensión aplicada, ya que I_C es mayor que I_L.

Problema 33. ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y la tensión aplicada al circuito?

$$\tan\theta = I_{LC}/I_R = 1.2/0.44 = 2.73 \qquad \theta = 69.9°$$

Puesto que I_C es mayor que I_L, la corriente está adelantada 69.9° con respecto a la tensión aplicada.

Problema 34. ¿Qué potencia se consume en el circuito?

La potencia consumida es potencia real y, ya que se conocen los valores de la resistencia del circuito y la corriente I_R, puede calcularse la potencia real por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{REAL} = I_R^2 R = (0.44)^2 \times 500 = 97 \text{ watts}$$

resumen

☐ Para calcular la impedancia de un circuito paralelo LCR, primero se resuelve el circuito en paralelo LC y luego se combina la reactancia neta con el resistor como en un circuito en paralelo RL o RC. El circuito en paralelo LC se caracteriza por la más pequeña de las dos reactancias. ☐ La tensión aplicada a un circuito en paralelo LCR se usa como referencia de fase.

☐ Las tres corrientes de ramas de un circuito en paralelo LCR son independientes y se encuentran por las expresiones: $I_L = E_{AP}/X_L$; $I_C = E_{AP}/X_C$; e $I_R = E_{AP}/R$. ☐ Las dos corrientes reactivas se suman como en un circuito en paralelo LC: $I_{LC} = I_L - I_C$ cuando I_L mayor que IC; e $I_{LC} = I_C - I_L$ para I_C mayor que I_L. ☐ La corriente en la línea se encuentra según la expresión: $I_{LINEA} = \sqrt{I_R^2 + I_{LC}^2}$. ☐ El ángulo de fase se obtiene según $\tan \theta = I_{LC}/I_R$; o $\tan \theta = R/X$; o $\cos \theta = Z/R$ lo que se realiza efectuando un adelanto o atraso de la corriente respecto a la tensión, dependiendo de las magnitudes relativas de las corrientes inductiva y capacitiva.

☐ La impedancia de un circuito en paralelo LCR se obtiene determinando la reactancia neta, X, de las ramas L y C, y luego combinándola vectorialmente con R. La ecuación para la impedancia es $Z = XR/(\sqrt{X^2 + R^2})$. ☐ El circuito se comportará como un circuito RL o RC, dependiendo de cuál de las dos reactancias sea menor. ☐ La impedancia también se puede encontrar según $Z = E_{AP}/I_{LINEA}$. ☐ El efecto que tiene la frecuencia sobre un circuito en paralelo LCR es similar al que tiene sobre circuitos paralelo LC, excepto porque la impedancia máxima nunca puede ser mayor que el valor de la resistencia.

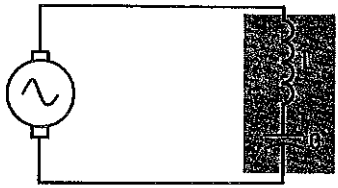
preguntas de repaso

Para las preguntas 1 a 5, suponga un circuito en paralelo LCR, con una resistencia de 25 ohms, una reactancia inductiva de 50 ohms, y una reactancia capacitiva de 75 ohms.

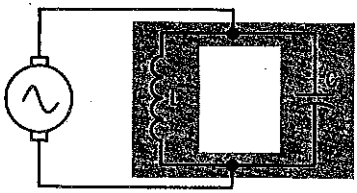
1. ¿Cuál es la impedancia del circuito?
2. ¿Cuál es la reactancia neta del circuito?
3. Si la frecuencia se duplica, ¿cuál será la impedancia?
4. Si la frecuencia se reduce a la mitad, ¿cuál será la impedancia?
5. Si la capacitancia es de 2 microfarads, ¿cuál es la inductancia?

Para las preguntas 6 a 8, suponga un circuito en paralelo LCR con una tensión aplicada de 100 volts, y una corriente en la línea de 20 amperes.

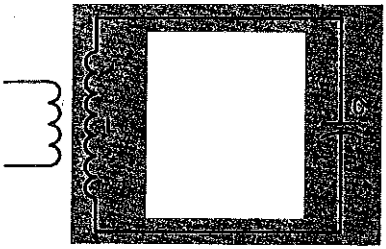
6. Si el ángulo de fase es de 30 grados, ¿cuál es la resistencia?
7. ¿Cuál es el factor de potencia del circuito?
8. ¿Cuál es la potencia aparente del circuito?
9. Para un circuito en paralelo LCR, las corrientes resistiva, inductiva y capacitiva son 10, 22.5 y 15 amperes, respectivamente. ¿Cuál es la potencia en la línea?
10. ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito de la pregunta 9?

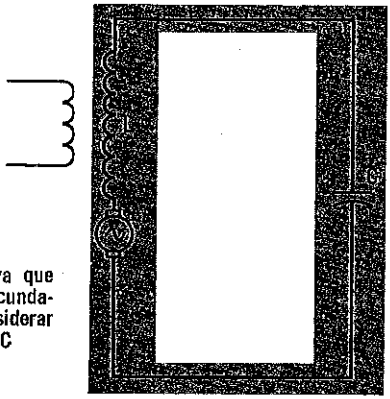


En un circuito serie resonante, la fuente de voltaje está en serie con L y C



En un circuito resonante en paralelo, la fuente de voltaje está en paralelo con L y C





Este es un circuito en serie resonante ya que el voltaje inducido es L, que es un secundario, el transformador, se puede considerar como un generador en serie con L y C

resonancia en paralelo

En circuitos en paralelo LC, la resonancia en paralelo es la equivalente de la resonancia en serie de circuitos en serie LCR. Sin embargo, las *características* de la resonancia en paralelo son notablemente *diferentes* de las que se observan en la resonancia en serie.

Para cualesquier valores de inductancia y capacitancia dados, la *frecuencia* a la cual tiene lugar la resonancia en paralelo, es *idéntica* a la frecuencia a la cual tendría lugar la resonancia en serie, para los mismos valores de L y C. Por lo tanto, la resonancia en paralelo también se puede obtener a partir de la expresión:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Siendo este el caso, también se pueden aplicar aquí las ecuaciones que se estudiaron para determinar L o C:

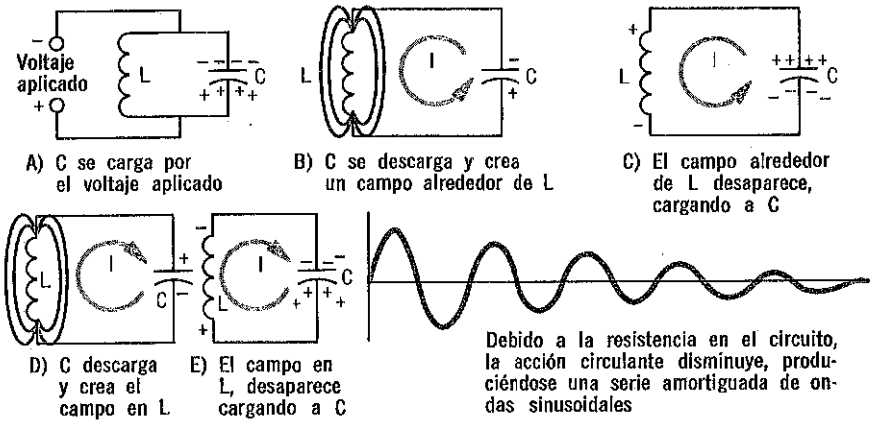
$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2 C} \qquad \text{y} \qquad C = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2 L}$$

Como algunas veces es difícil distinguir los circuitos resonantes en serie de los circuitos resonantes en paralelo, se considera que un circuito resonante en serie tiene la fuente de tensión en serie con L y C; y que un circuito resonante en paralelo tiene la fuente de tensión en paralelo con L y C.

circuito tanque

Las propiedades de un circuito resonante en paralelo deben a la acción que ocurre entre la inductancia y capacitancia, en paralelo, que suele llamarse *circuito tanque*, ya que tiene la capacidad de *almacenar* energía eléctrica.

Básicamente, la acción de un circuito tanque consiste en un *intercambio de energía* entre la inductancia y la capacitancia. Si se aplica *momentáneamente* una tensión en el circuito tanque, C se carga a esta tensión. Cuando se deja de aplicar tensión, C se descarga a través de L, con lo cual se crea un campo magnético en L, debido a la corriente de descarga. Cuando C se ha descargado, el campo encadenado con L desaparece y, al hacerlo, induce una corriente que tiene la misma dirección que la corriente que ha creado el campo. Por lo tanto, esta corriente carga a C en dirección opuesta. Cuando ha desaparecido el campo en L, se descarga nuevamente; pero esta vez en dirección opuesta a la anterior. La corriente de descarga ocasiona que nuevamente se forme un campo magnético encadenado con L que, cuando desaparece nuevamente, carga a C en la misma dirección en que estaba cargada inicialmente.



Si se tuviese un circuito *tanque ideal* sin resistencia, este intercambio de energía y la corriente circulante que produce continuarían produciendo *indefinidamente* una serie de ondas sinusoidales. Sin embargo, como siempre existe alguna resistencia, la corriente circulante disminuye gradualmente cuando, la resistencia disipa la energía del circuito en forma de calor. Esto causa el amortiguamiento de la corriente sinusoidal. Si nuevamente se aplicara momentáneamente una tensión al circuito, se reanudaría el intercambio de energía y la corriente circulante concurrente.

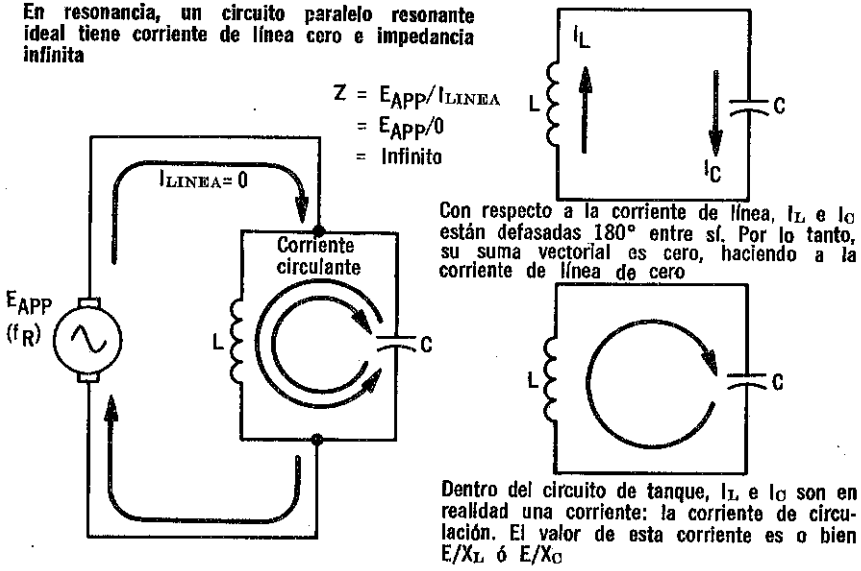
corriente e impedancia en resonancia

Cuando se aplica una tensión de c-a a cualquier circuito en paralelo LC con resistencia nula, las corrientes en las ramas inductiva y capacitiva son iguales a:

$$I_L = E/X_L \qquad I_C = E/X_C$$

En resonancia, X_L es igual a X_C, de manera que ambas corrientes son iguales, y, puesto que en un circuito en paralelo LC ambas corrientes están defasadas 180 grados y la corriente de línea, que es su suma vectorial, debe ser *cero*. Así pues, la única corriente es la que circula en el circuito tanque. No hay corriente en la línea. Y si no hay corriente en la línea, esto significa que el circuito tiene *impedancia infinita*, por lo que respecta a la fuente de tensión.

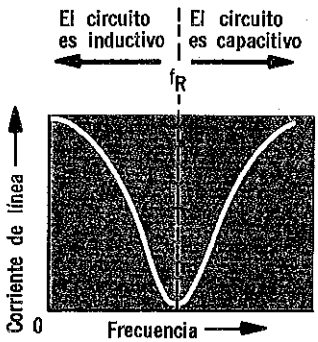
En resonancia, un circuito paralelo resonante ideal tiene corriente de línea cero e impedancia infinita

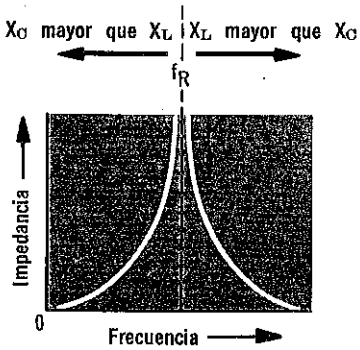


Estas dos condiciones de cero corriente de línea e impedancia infinita son características de los circuitos resonantes en paralelo *ideales*, en resonancia. En los circuitos reales, que tienen algo de resistencia, no se dan las condiciones teóricas de cero corriente de línea e impedancia infinita, en lugar de ello, los circuitos resonantes en paralelo tienen *corriente de línea mínima* e *impedancia máxima* en resonancia. Se reconocerá que esto es exactamente lo *opuesto* a los circuitos resonantes en serie que, en resonancia, tienen corriente máxima e impedancia mínima.

corriente e impedancia fuera de resonancia (cont.)

A frecuencias fuera de resonancia, la corriente en la línea es igual a la diferencia (suma vectorial) entre los valores de las corrientes en las ramas. La corriente circulante sigue fluyendo en el circuito de tanque y es igual a la *menor* de las dos corrientes de rama. De ahí que, si I_L es 5 amperes e I_C es 3 amperes, la corriente circulante es de 3 amperes y la corriente en la línea es de 2 amperes. En efecto, la corriente en la línea es la parte de la corriente de rama mayor que no forma parte de la corriente circulante del circuito de tanque. Puesto que la corriente en la rama I_L es inductiva y la corriente en la rama I_C es capacitiva, la corriente en la línea es *inductiva*, si I_L es *mayor* (lo cual significa que X_L es menor que X_C) y es capacitiva si I_C *es mayor* (lo que significa que X_C es menor que X_L). Esto es lo opuesto a lo que sucede en circuitos resonantes en serie, los cuales, según se recordará, son inductivos cuando X_L es mayor y capacitivos cuando X_C es mayor.

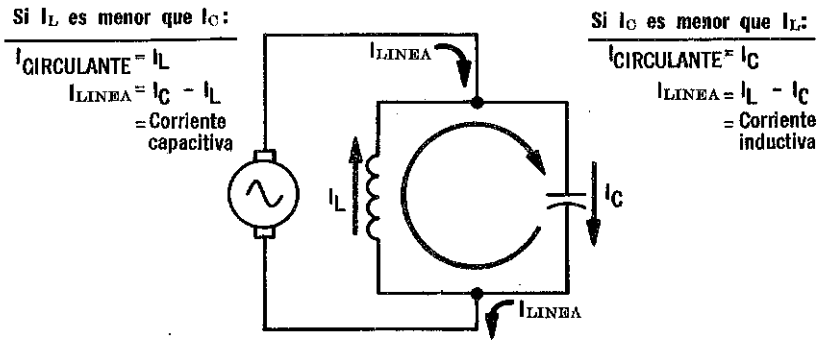




Se pueden observar en la figura las curvas que indican la forma en que cambian la corriente en la línea y la impedancia de un circuito resonante en paralelo al variar la frecuencia. Nótese que la forma característica de la curva *corriente*-frecuencia para el circuito resonante en paralelo es la misma que la curva *impedancia*-frecuencia para circuitos resonantes en serie. En forma similar, la curva impedancia-frecuencia para un circuito paralelo, es la misma que la curva corriente-frecuencia para circuitos en serie.

corriente e impedancia fuera de resonancia

En el circuito resonante en paralelo ideal en resonancia, las corrientes de rama I_L e I_C, son iguales de manera que la corriente en la línea es cero y la impedancia del circuito es infinita. En frecuencias superiores e inferiores a la resonante, una de las reactancias (X_L o X_C) es mayor que la otra. Por lo tanto, ambas *corrientes de rama* son *desiguales* y la *corriente en la línea,* que es igual a su suma vectorial (o diferencia aritmética) tiene un valor *mayor que cero.* Además, puesto que hay corriente en la línea, la *impedancia* del circuito ya no es infinita. Cuanto más se aleje la frecuencia de la frecuencia resonante, mayor será la diferencia entre los valores de la reactancia. Como resultado, será mayor la corriente en la línea y menor la impedancia del circuito.



La corriente circulante en el circuito tanque es igual a la más pequeña de las corrientes de rama. La corriente de línea es igual a la diferencia entre las dos corrientes de rama y tiene la misma relación de fase que la mayor de las dos

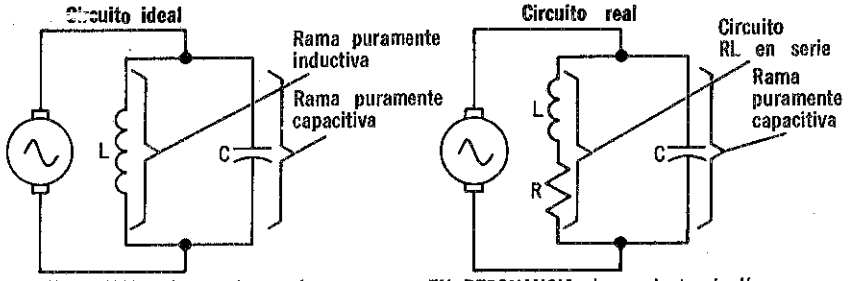
La impedancia a cualquier frecuencia se puede calcular por medio de la ecuación estudiada previamente para calcular la impedancia de un circuito en paralelo LC. Esto es,

$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_C + X_L}$$

Donde X_L y X_C son las reactancias a la frecuencia particular en cuestión. Además, según se ha estudiado para circuitos en paralelo LC, la impedancia siempre es mayor que, por lo menos, una de las reactancias, en lugar de ser siempre menor que ambas, como ocurre en otros tipos de circuitos en paralelo de c-a.

circuitos resonantes en paralelo reales

Los circuitos reales de resonancia en paralelo difieren del circuito en paralelo ideal que se acaba de describir en un aspecto importante: los circuitos reales tienen *resistencia.* Esta resistencia existe en la inductancia, la capacitancia y los conductores de interconexión. Sin embargo, normalmente sólo la resistencia de la inductancia es lo suficientemente alta como para tomarla en consideración. Al analizar un circuito, se considera que esta resistencia está en *serie* con la *inductancia.* Por lo tanto, un circuito resonante en paralelo consta de una rama puramente capacitiva y una rama inductiva que, en realidad, es un circuito en serie RL. De lo que ya se ha visto acerca de la relación 10:1 se recordará que, si la reactancia inductiva de la inductancia es 10 o más veces mayor que su resistencia en general se puede hacer caso omiso de la resistencia. Entonces el circuito podrá analizarse de la misma manera que el circuito resonante en paralelo ideal. Sin embargo, para que quede mejor explicado, se incluirán los efectos de la resistencia, independientemente de su valor con respecto a XL.



EN RESONANCIA: la corriente de línea es cero, la impedancia es infinita

EN RESONANCIA: la corriente de línea es mínima, la impedancia es máxima

El principal efecto que tiene la resistencia en un circuito resonante en paralelo es hacer que la corriente de rama inductiva se atrase con respecto a la tensión aplicada, por un ángulo de fase *inferior* a 90 grados, y no por 90 grados exactos, como en el caso del circuito ideal. Como resultado, las dos corrientes de las ramas no están defasadas 180 grados. Por sencillez, la resonancia puede seguirse considerando que se presenta cuando X_L es igual a X_C; pero ahora, cuando ambas corrientes en las ramas respectivas se suman vectorialmente, su suma *no es* cero. Esto significa que, en resonancia, hay algo de corriente en la línea. Y puesto que hay corriente en la línea, la impedancia no puede ser infinita, como en el circuito ideal. Así pues, en resonancia, los circuitos resonantes paralelo tienen corriente *mínima* en la línea y resistencia *máxima*, en lugar de corriente cero en la línea e impedancia infinita, como los circuitos ideales.

circuitos resonantes en paralelo reales (cont.)

En resonancia, la *corriente en la línea* en un circuito práctico resonante paralelo está *en fase* con la *tensión aplicada*. Esto se debe a que, como X_L y X_C son iguales, la componente reactiva (inductiva) de la corriente de rama RL es igual a la corriente (capacitiva) de rama capacitiva y con ello la cancela. Por lo tanto, sólo la componente *resistiva* de la corriente de rama RL fluye en la línea. Puesto que la rama capacitiva no tiene resistencia, la corriente en ella es igual a:

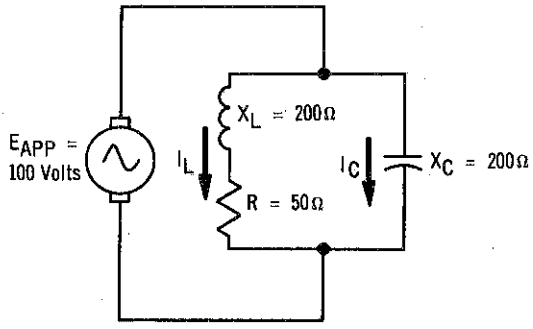
$$I_C = E/X_C$$

La corriente de rama inductiva se calcula igual que en cualquier circuito en serie RL, por lo que es igual a:

$$I_L = E/\sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Entonces puede determinarse la corriente en la línea sumando vectorialmente las dos corrientes de rama. Sin embargo, las corrientes de rama difieren en fase por un ángulo inferior a 180 grados, pero mayor que 90 grados. Por lo tanto, al sumarlos vectorialmente no se puede usar el teorema de Pitágoras, ya que éste se aplica solamente a cantidades que difieren 90 grados y no se puede restar aritméticamente, ya que esto sólo se aplica a cantidades defasadas 180 grados. Sin embargo, se pueden sumar descomponiéndolas primeramente en sus componentes vertical y horizontal, luego sumar las componentes y, finalmente, determinar la resultante de todas las componentes. La suma de vectores por componentes ya se ha descrito anteriormente. En resonancia, el cálculo de la corriente en la línea, así como la corriente circulante en el circuito tanque y la impedancia del circuito, se puede efectuar más fácilmente usando la Q del circuito.

Las corrientes de rama se suman vectorialmente por componentes, para encontrar la corriente de línea en circuitos resonantes en pararelos reales



circuitos resonantes en paralelo reales (cont.)

Las corrientes en las ramas, I_L e I_C, del circuito de la página 4-138 son:

$$I_L = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{100}{\sqrt{(50)^2 + (200)^2}} = 0.486 \text{ ampere}$$

$\tan \theta = X_L/R = 200/50 = 4$ $\theta = 76°$; la corriente está atrasada con respecto a la tensión

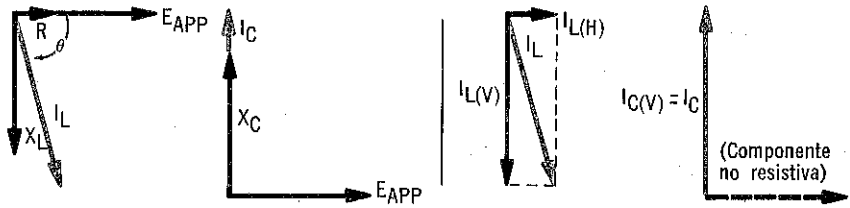
$$I_C = E/X_C = 100/200 = 0.5 \text{ ampere}$$

Las componentes horizontales (H) y verticales (V) de las corrientes de rama son:

$I_{L(H)} = I_L \cos \theta = 0.486 \times 0.242 = 0.118$ ampere

$I_{L(V)} = I_L \text{ sen } \theta = 0.486 \times 0.97 = 0.47$ ampere

$I_{C(H)} = 0$; no hay componente resistiva $I_{C(V)} = 0.5$ ampere



Las componentes totales, horizontales y verticales, son:

$$I_{TOT(H)} = I_{L(H)} + I_{C(H)} = 0.118 + 0 = 0.118 \text{ ampere}$$

$$I_{TOT(V)} = I_{C(V)} - I_{L(V)} = 0.5 - 0.47 = 0.03 \text{ ampere}$$

El signo menos de la euación $I_{TOT(V)}$ indica que el vector $I_{L(V)}$ señala hacia abajo, o que está atrasado con respecto a la tensión.

La resultante de las componentes totales, que es la corriente en la línea, es

$$I_{LINEA} = \sqrt{I^2_{TOT(H)} + I^2_{TOT(V)}} = \sqrt{(0.118)^2 + (0.03)^2} = 0.123 \text{ ampere}$$

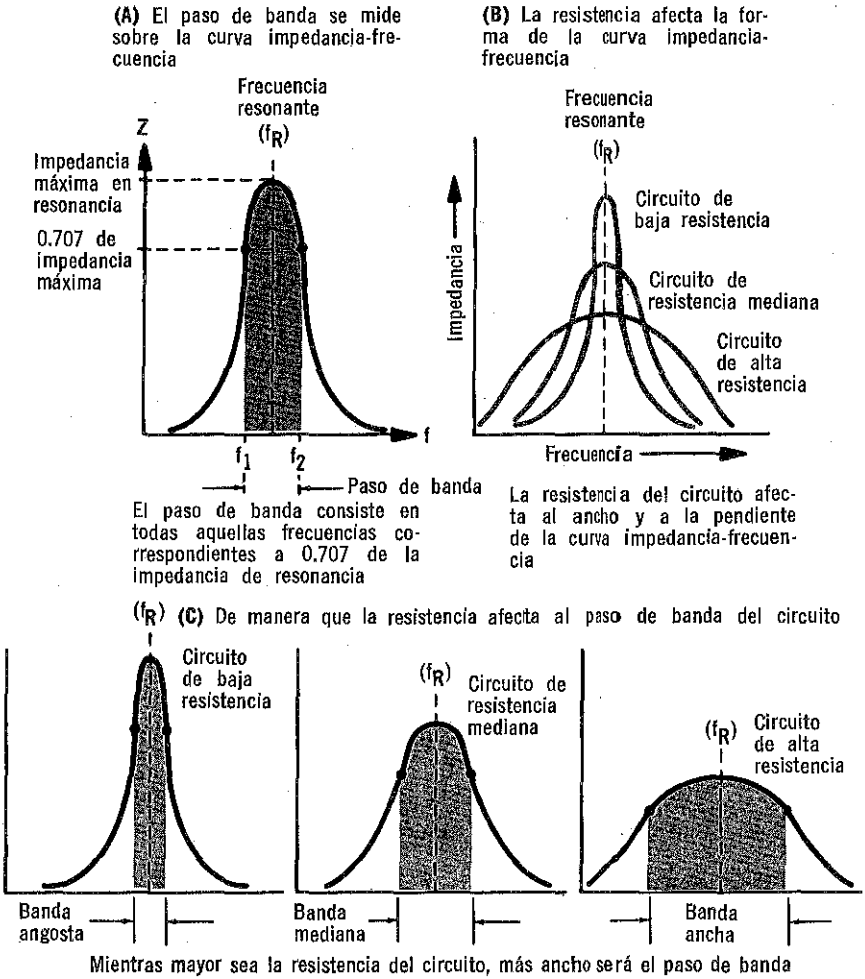
El ángulo de fase entre la corriente en la línea y la tensión aplicada, es

$$\tan \theta = \frac{I_{TOT(V)}}{I_{TOT(H)}} = \frac{0.03}{0.118} = 0.254$$

$\theta = 14.3°$; la corriente está adelantada con respecto a la tensión

banda de resonancia

Se recordará que en todo circuito resonante en serie existe un *rango de frecuencia* entre valores superiores e inferiores al de la frecuencia resonante donde, para todo objeto práctico, se puede considerar que el circuito está en resonancia. Este rango de frecuencias ha sido llamado *banda de resonancia* o *banda de paso* y consta de todas las frecuencias donde la corriente en el circuito era 0.707 o más veces su valor en resonancia. Los circuitos resonantes en paralelo también tienen una banda de resonancia; pero se define en función de la *curva impedancia-frecuencia* y consta de todas las frecuencias que producen una impedancia de circuito con un valor de 0.707 o más veces la impedancia en resonancia.



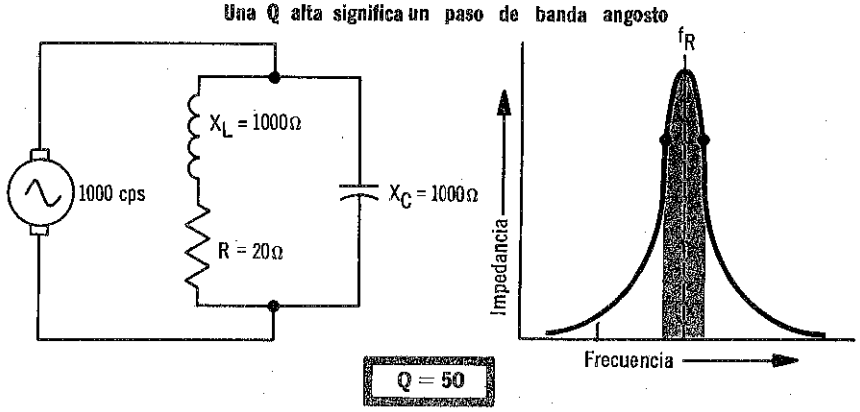
Q de un circuito resonante en paralelo

Según se recordará, la Q, o calidad, de un circuito resonante en serie está determinada por la relación de la tensión aplicada, ya sea X_L o X_C, con respecto a la tensión aplicada total. Para resonancia en paralelo, la Q mide también la calidad de un circuito. Sin embargo, en circuitos resonantes en paralelo, Q no se determina a base de la tensión, sino más bien de la corriente. La Q de un circuito resonante en paralelo se define como la *relación* existente entre la corriente en el circuito *tanque* y la corriente en la *línea*. Por lo tanto,

$$Q = I_{TANQUE}/I_{LINEA}$$

donde I_{TANQUE} es la corriente circulante en el tanque. Matemáticamente, esta ecuación se puede convertir a la forma:

$$Q = X_L/R$$



La Q de un circuito resonante en paralelo representa su capacidad para discriminar entre frecuencias resonantes y no resonantes. La Q es la relación de I_{TANQUE} a I_{LINEA}; pero se puede calcular más fácilmente de la ecuación $Q = X_L/R$. En función de su Q, el paso de banda de un circuito resonante en paralelo es paso de banda $= f_R/Q$

Puede verse que ésta es la misma ecuación usada para calcular la Q de un circuito resonante en serie. Como resultado, la resistencia tiene el mismo efecto en la Q de un circuito resonante en paralelo, que en un circuito resonante en serie. Cuanto *más baja* sea la *resistencia,* más *alta* será la Q del circuito y más angosta su banda de paso. Recíprocamente, cuanto más *alta* sea la *resistencia, más baja* será la Q y *más ancha* la *banda de paso.*

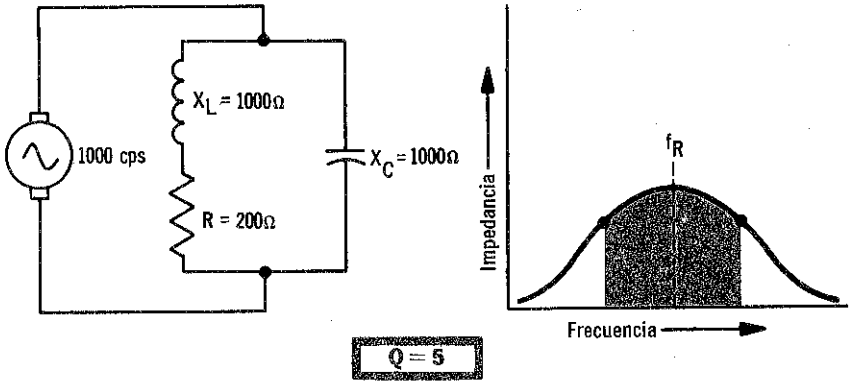
Q de un circuito resonante en paralelo (cont.)

Si se conoce la Q de un circuito, se puede calcular la banda de paso de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Banda de paso (cps)} = f_R/Q$$

Por lo tanto, los circuitos que tienen Q elevada pueden discriminar entre frecuencias resonantes y no resonantes mejor que los circuitos con Q baja. En aplicaciones prácticas, cuando la Q de un circuito resonante en paralelo es 10 o más, puede hacerse caso omiso de la resistencia, y considerarse el circuito como un circuito resonante en paralelo, casi ideal.

Una Q baja significa un paso de banda ancho



Una vez conocida la Q, pueden obtenerse fácilmente los valores en resonancia, a partir de las demás magnitudes importantes del circuito. Estas magnitudes son la impedancia (Z), la corriente de tanque (I_{TANQUE}), y la corriente en la línea (I_{LINEA}).
Las ecuaciones para calcular la impedancia en función de Q son:

$$Z = QX_L$$

ó

$$Z = QX_C$$

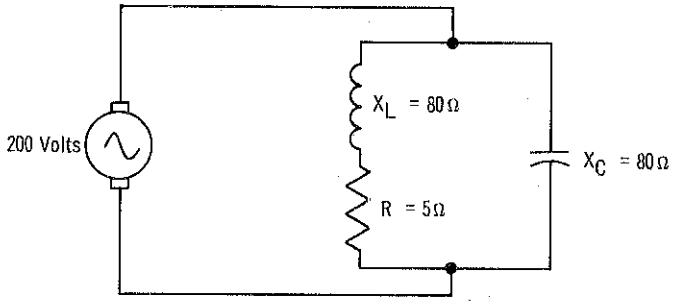
La ecuación para calcular I_{TANQUE}, en función de Q es

$$I_{TANQUE} = QI_{LINEA}$$

Las ecuaciones para calcular I_{LINEA} en función de Q son

$$I_{LINEA} = E/QX_L$$
$$I_{LINEA} = E/QX_C$$

problemas resueltos



Problema 35. ¿Está en resonancia este circuito?

Recuérdese que, aquí, X_L y X_C son iguales solamente a la frecuencia resonante. Puesto que tanto X_L como X_C son iguales a 80 ohms, el circuito debe estar en resonancia.

Problema 36. ¿Cuál es el valor de la corriente que fluye en el circuito tanque?

Una forma de resolver este problema, es usar la ecuación $I_{TANQUE} = QI_{LINEA}$. Naturalmente, primero deben determinarse Q e I_{LINEA}.

Cálculo de Q:

$$Q = X_L/R = 80/5 = 16$$

Cálculo de I_{LINEA}:

$I_{LINEA} = E/Z = E/QX_L = 200/(16 \times 80) = 0.156$ ampere

Cálculo de I_{TANQUE}:

$$I_{TANQUE} = QI_{LINEA} = 16 \times 0.156 = 2.5 \text{ amperes}$$

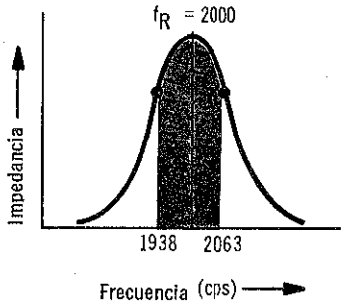
Así, pues, con sólo 0.156 amperes en la línea, se tendrán 2.5 amperes en el tanque.

Problema 37. Si la frecuencia resonante es 2000 cps, ¿cuál es la anchura de banda de este circuito?

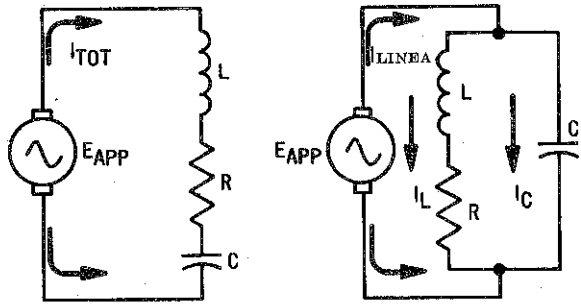
Mediante la Q del circuito, calcule la anchura de banda de:

$$\text{Anchura de banda (cps)} = f_R/Q = 2{,}000/16 = 125 \text{ ciclos}$$

Por lo tanto, la anchura de banda se extiende desde aproximadamente 1,938 cps (2,000 − 62.5) a aproximadamente 2,063 cps (2,000 + 62.5)



comparación de circuitos resonantes en serie y en paralelo



PROPIEDADES EN RESONANCIA

	Circuito resonante en serie	Circuito resonante en paralelo
Frecuencia resonante (f_R)	$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Reactancia	$X_L = X_C$	$X_L = X_C$
Impedancia	Mínimum; $Z = R$	Máximum; $Z = QX_L$
Corriente (I_{TOT} ó I_{LINEA})	Máximum; I_{TOT}	
Q, Calidad	$E_L/E_{AP} = X_L/R$	$I_{TANQUE}/I_{LINEA} = X_L/R$
Anchura de banda	f_R/Q	f_R/Q

PROPIEDADES FUERA DE RESONANCIA

	Circuito resonante en serie		Circuito resonante en paralelo	
	Arriba f_R	Abajo f_R	Arriba f_R	Abajo f_R
Reactancias	$X_L > X_C$	$X_C > X_L$	$X_L > X_C$	$X_C > X_L$
Impedancia	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Disminuye
Angulo de fase Entre E_{AP} e I_{TOT} ó I_{LINEA}	I atrasada de E	I adelantada de E	I adelantada de E	I atrasada de E
Circuito inductivo o capacitivo	Inductiva	Capacitiva	Capacitiva	Inductiva

resumen

☐ Las propiedades de un circuito resonante en paralelo se deben al intercambio de energía que hay entre un inductor y un capacitor conectados en paralelo de una fuente de energía. Este circuito con frecuencia recibe el nombre de circuito tanque. ☐ Para un inductor y capacitor dados, la frecuencia donde ocurre la resonancia en paralelo se determina según la expresión: $f_R = 1/(2\pi \sqrt{LC})$. ☐ Teóricamente, un circuito resonante en paralelo tiene impedancia infinita y cero corriente en la línea. Sin embargo, los circuitos resonantes en paralelo reales presentan la impedancia máxima y corriente de línea mínima en resonancia. ☐ Para frecuencias mayores o menores que la frecuencia resonante, la corriente en la línea de un circuito resonante en paralelo aumenta progresivamente, en tanto que su impedancia disminuye.

☐ Los circuitos resonantes en paralelo reales tienen resistencia, así como inductancia y capacitancia. Normalmente, esta resistencia es la del alambre inductor y se puede considerar que está en serie con la inductancia. ☐ El efecto principal de la resistencia es que, estando en resonancia ninguna de las dos corrientes de rama están defasadas 180°, de manera que se tiene la corriente de línea en el circuito. ☐ Las magnitudes de las corrientes de rama se pueden determinar según la expresión $I_C = E/X_C$ y $E/(\sqrt{R^2 + X_L^2})$. ☐ La corriente en la línea se puede determinar sumando vectorialmente las corrientes en la línea.

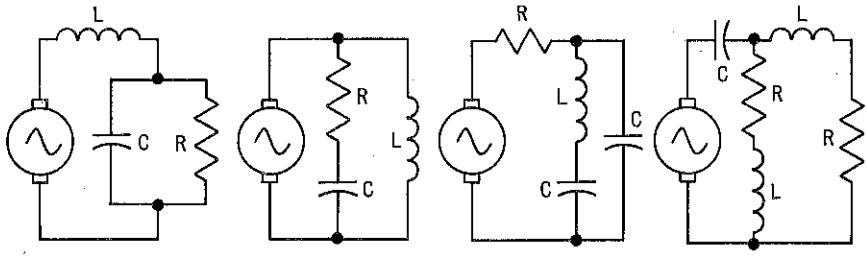
☐ La banda de paso de un circuito resonante en paralelo consta de todas las frecuencias que producen una impedancia de circuito con un valor de 0.707 o más veces la impedancia en resonancia. ☐ La banda de paso se puede calcular a partir de la Q de un circuito: Banda de paso (cps) $= f_R/Q$. ☐ La Q o calidad del circuito es la relación que hay entre la corriente circulante en el tanque (I_{TANQUE}) y la corriente de línea (I_{LINEA}) ó $Q = I_{TANQUE}/I_{LINEA}$.

preguntas de repaso

1. ¿Qué es un *circuito resonante en paralelo ideal*?
2. ¿En qué forma difiere un circuito resonante en paralelo real de un circuito ideal?
3. ¿Cuál es la frecuencia resonante de un capacitor de 50 microfarads y una bobina de 50 milihenrys conectados en paralelo?
4. ¿Cómo se produce la corriente circulante en un circuito tanque?
5. ¿Qué significa *amortiguación* en un circuito tanque?
6. Trace la curva impedancia-frecuencia para un circuito resonante en paralelo.
7. ¿Cómo se define la anchura de banda de un circuito resonante en paralelo?
8. ¿Qué se entiende por Q de un circuito resonante en paralelo?
9. ¿Cómo se relaciona Q con la resistencia? ¿Cómo se relaciona con la anchura de banda?
10. Si un circuito resonante en paralelo tiene una frecuencia de 1,000 cps y una Q de 10, ¿cuál es su anchura de banda?

circuitos en serie y paralelo RL, RC y LCR

Con una sola excepción, todos los circuitos en paralelo que se tratan en este volumen, constan de ramas que son exclusivamente resistivas, inductivas o capacitivas. En la práctica, se observará que, a menudo, las ramas en paralelo tienen más de una de las magnitudes de resistencia, inductancia y capacitancia. Por lo tanto, en realidad estas ramas son *circuitos en serie.*



Estos son circuitos en serie y paralelo se pueden resolver usando una combinación de las técnicas que se han aprendido en este volumen

Los circuitos en paralelo que tienen ramas que no son puramente resistivas, inductivas o capacitivas, reciben el nombre de *circuitos en serie y paralelo.* Para resolver estos circuitos se utiliza una combinación de los métodos estudiados en este volumen. Primero se tratan las ramas como circuitos *en serie* y se resuelven las magnitudes de las ramas que se desee, por ejemplo, corriente o impedancia. Una vez conocidas las corrientes e impedancias de rama, se tratan como cantidades en *paralelo* y se calcula toda la corriente del circuito y su impedancia, según los métodos estudiados en circuitos en paralelo.

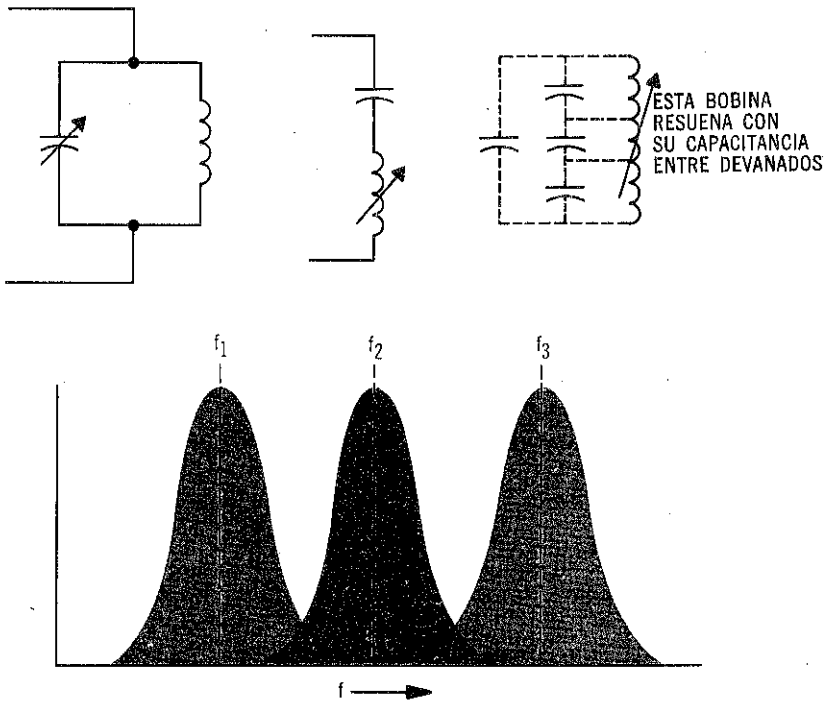
Otra forma de circuitos en serie y paralelo es básicamente un circuito en serie, donde hay uno o más elementos en paralelo que están en serie con los elementos en serie. Para resolver este tipo de circuito, primero se resuelven las partes en paralelo y luego se usan los valores obtenidos para resolver el circuito total en serie.

Se observará que la principal diferencia entre la solución de circuitos en serie y paralelo y circuitos ordinarios en serie o en paralelo, es que en los circuitos en serie y paralelo, los ángulos entre las varias corrientes e impedancias de rama no son de 180 o 90 grados, como lo son en circuitos en serie o en paralelo, por lo cual es necesario efectuar las adiciones vectoriales, resolviendo primero las magnitudes en sus componentes. Un ejemplo de este cálculo de circuitos aparece en la página 4-139 para circuitos resonantes en paralelo reales.

circuitos sintonizados

Hasta ahora, se han estudiado circuitos resonantes en serie y en paralelo LC en los que se usaban inductores y capacitores *fijos,* en los que la frecuencia resonante era determinada por el valor de los elementos usados. Sin embargo, se pueden usar inductores o capacitores variables en circuitos resonantes, de manera que se puedan *cambiar* los valores. Si se usan elementos variables, el punto de resonancia también cambiará y el circuito se puede sintonizar en cualquier banda de frecuencia. La sintonización se puede efectuar mediante un *capacitor* variable o un *inductor* variable, o con ambos. Habitualmente, en altas frecuencias sólo se usa una bobina de un circuito sintonizado. En este caso, la inductancia de la bobina resuena con la capacitancia producida entre los devanados de la bobina.

A veces se usa una bobina con derivaciones, combinada con un capacitor que se conecta a diferentes segmentos de la bobina para cambiar de rango de frecuencia. Luego, generalmente, la bobina o el capacitor se *sintonizan en fino,* para ajustar el punto resonante a la frecuencia precisa. De la misma manera, se pueden cambiar partes nuevas introduciéndolas o sacándolas del circuito resonante, para el mismo objeto.

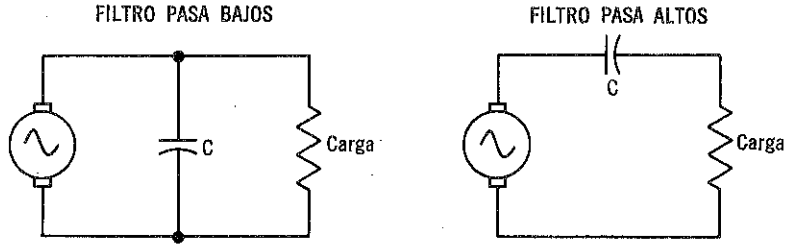


Si se usan capacitores o inductores variables en circuitos resonantes, se pueden cambiar el punto de resonancia y las frecuencias de paso de banda a una variedad de frecuencias, con un simple ajuste

circuitos de filtro

Según se emplea en los circuitos eléctricos, el término filtro significa ofrecer una gran oposición, o *rechazar* las tensiones y corrientes de ciertas frecuencias, al mismo tiempo que ofrecen poca oposición o *pasos*, a las tensiones y corrientes de otras frecuencias. Los circuitos que poseen esta propiedad se llaman *circuitos de filtro*. Los circuitos de filtro se dividen en varios grupos, según las frecuencias que pasan y rechazan. Uno de estos grupos pasa todas las frecuencias hasta cierto valor, rechazando a todas las que están arriba de esta frecuencia. Este tipo de filtro se llama *filtro pasabajo*. Otro grupo de filtros rechaza todas las frecuencias hasta cierto valor y pasa todas las frecuencias mayores que ese valor. A éstos se les llama *filtros pasaaltos*. Otros filtros pasan ciertos rangos o bandas de frecuencias y rechazan a todas las frecuencias ajenas a la banda. A éstos se les llama filtros de *paso de banda*. Otros más rechazan una banda de frecuencias y pasan a todas las frecuencias ajenas a la banda. Son filtros de *rechazo de banda*. Estos son los tipos principales de circuitos de filtro.

Por los circuitos filtro pasan ciertas frecuencias, rechazando otras



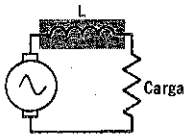
Los inductores y los capacitores son los elementos que más comúnmente se usan en circuitos de filtro debido a que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva que tienen varían de acuerdo con la frecuencia. La forma en que se conecten con respecto *a* la *carga* determina si funcionan como filtros pasabajos, pasaaltos, paso de banda y rechazo de banda.

Un capacitor conectado a una carga puede funcionar como filtro pasabajos, ya que X_C es muy alta a bajas frecuencias y esencialmente el capacitor no tiene efecto en el circuito. Sin embargo, arriba de cierta frecuencia, X_C disminuye hasta el punto en que la mayor parte de la corriente fluye a través de él, ya no a través de la carga.

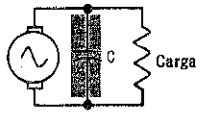
El mismo capacitor puede funcionar como filtro pasaaltos si se conecta en serie con la carga. En este caso, la alta X_C a bajas frecuencias mantiene bajo el valor de la corriente. Sin embargo, arriba de cierta frecuencia, X_C es tan bajo que el capacitor es esencialmente un corto circuito. Entonces la corriente en la carga es alta.

tipos básicos

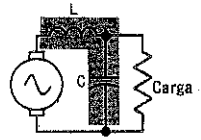
FILTROS DE PASA BAJOS



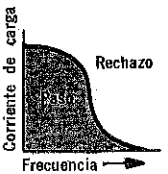
X_L es baja a bajas frecuencias, de manera que la corriente de carga es alta. Para frecuencias altas, X_L es grande de manera que la corriente de carga es pequeña



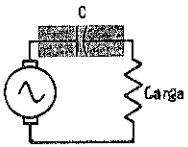
X_C es alta a bajas frecuencias, de manera que C tiene poco efecto sobre el circuito. A frecuencias altas, X_C es baja y puntea la mayor parte de la corriente, quitándola de la carga



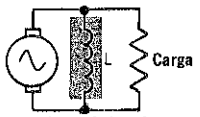
Este circuito combina el comportamiento de los circuitos simples L y C



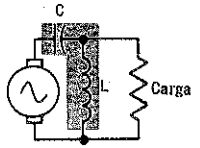
FILTROS PASA ALTOS



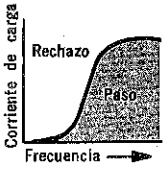
X_C es alta a bajas frecuencias, de manera que la corriente de carga es baja. A altas frecuencias, X_C es pequeña, de manera que la corriente de carga es grande



X_L es baja a bajas frecuencias, de manera que L puente la mayor parte de la corriente quitándola de la carga. A altas frecuencias, X_L es grande y L no tiene efecto sobre el circuito

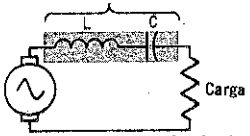


Este circuito combina el comportamiento de los circuitos simples L y C



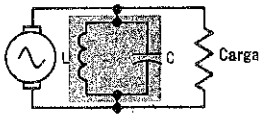
FILTROS DE PASO DE BANDA

Circuito resonante en serie

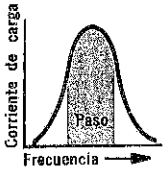


A frecuencias dentro de la banda de resonancia del circuito resonante en serie, la impedancia es baja, de manera que la corriente de carga es alta. A frecuencias fuera de la banda de resonancia, el circuito resonante tiene una impedancia alta, de manera que la corriente de carga es baja

Circuito resonante en paralelo

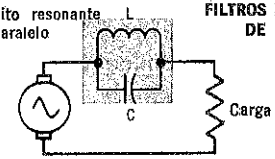


A frecuencias dentro de la banda de resonancia del circuito resonante en paralelo, la impedancia es alta, de manera que el circuito resonante no tiene efecto sobre la corriente de carga. A frecuencias fuera de la banda de resonancia, la impedancia es baja de manera que la mayor parte de la corriente es derivado fuera de carga



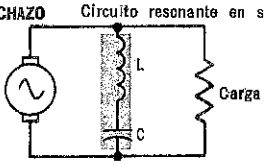
FILTROS DE RECHAZO DE BANDA

Circuito resonante en paralelo

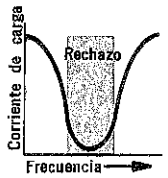


A frecuencias de la banda de resonancia, la impedancia es alta, de manera que la corriente de carga es baja. A frecuencias fuera de la banda resonante, la impedancia es baja, de manera que la corriente de carga es alta

Circuito resonante en serie



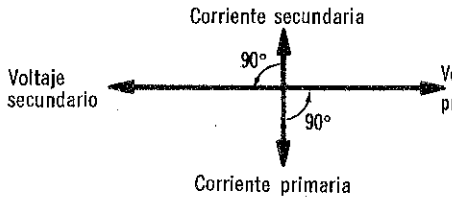
A frecuencias de la banda de resonancia, la impedancia es baja, de manera que la mayor parte de la corriente es derivada fuera de la carga. A frecuencias fuera de la banda de resonancia, la impedancia es alta, de manera que el circuito resonante no tiene efecto



vectores de transformadores

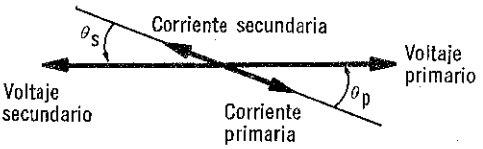
Se recordará que la teoría de operación de los transformadores comunes se ha expuesto en el volumen 1, en donde se describieron considerando exclusivamente las ondas de corriente y tensión que existen en el primario y el secundario. Las tensiones y corrientes del transformador también se pueden representar por medio de *vectores* como se muestra en seguida. Cuando se hace esto, se usa la *tensión primaria* como *referencia de fase* de cero grados y los demás vectores de tensión y corriente se indican en relación con ella.

En un transformador que tiene una corriente secundaria muy pequeña, la corriente primaria está atrasada 90 grados con respecto a la tensión primaria y la corriente secundaria está atrasada 90 grados con respecto a la tensión secundaria. Además, las tensiones primaria y secundaria están defasadas en 180 grados. Por lo tanto, en un diagrama vectorial los cuatro vectores que representan a las corrientes y tensiones son *perpendiculares*



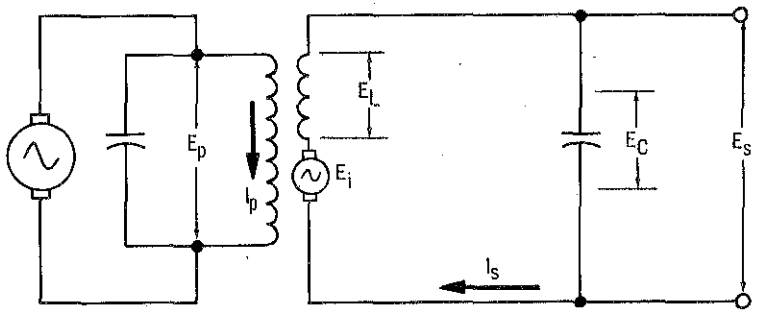
Cuando la corriente secundaria es muy pequeña, tanto la corrientes primaria como la secundaria son puramente inductivas y están atrasadas 90° con respecto a sus voltajes respectivos

Cuando la corriente nominal fluye en el secundario, tanto la corriente primaria como la secundaria son básicamente resistivas. Como resultado, están atrasadas con respecto a sus voltajes correspondientes por sólo un pequeño ángulo de fase



entre sí, según se ilustra. Al aumentar la corriente en el secundario —suponiendo que la carga secundaria es resistiva— la corriente en el secundario comienza a volverse resistiva. En consecuencia, ya no estará atrasada 90 grados con respecto a la tensión secundaria. Cuanta más corriente fluya en el secundario, éste se volverá más resistivo y menor será el ángulo entre la tensión secundaria y la corriente secundaria.

Se recordará que, cuando aumenta la corriente secundaria, el campo magnético creado en el devanado secundario hace que la corriente primaria aumente también, reduciendo efectivamente la reactancia inductiva del devanado primario. Al reducirse la reactancia inductiva del primario, éste también se vuelve más resistivo de manera que el ángulo entre su corriente y tensión también disminuye. Por lo tanto, el diagrama vectorial de un transformador con su corriente nominal, indica que las tensiones primaria y secundaria están defasadas 180 grados; además, el pequeño retraso de las dos corrientes en relación con sus respectivas tensiones está determinado por el mismo ángulo.

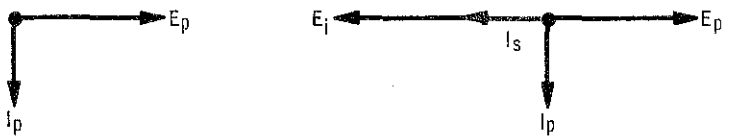


En los transformadores sintonizados, el voltaje de salida o secundario (E_S) no es realmente el voltaje inducido en el devanado secundario (E_i). Debido a que el circuito secundario es un circuito resonante en serie LC, los voltajes desarrollados en el inductor y en el capacitor son mayores y difieren en fase con el voltaje inducido. La tensión en el capacitor es en realidad el voltaje de salida y está 90° adelantado del voltaje primario, en resonancia

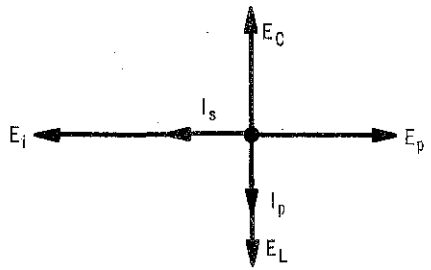
vectores de transformadores resonantes

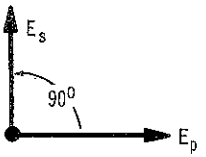
En la página anterior se repitió que, según lo estudiado en el volumen 3, las tensiones primaria y secundaria del transformador están defasadas 180 grados entre sí. Sin embargo, en resonancia no sucede lo mismo porque la tensión inducida en el secundario no es igual a la tensión que hay en la bobina. Se puede considerar que la tensión *inducida* en la bobina es una tensión *aplicada* a un circuito resonante en serie LC, de manera que la tensión *desarrollada* en la bobina y el capacitor son mucho mayores que la inducida en la bobina. La salida del transformador es en realidad la tensión originada en el capacitor, la cual tiene un ángulo de fase diferente al de la tensión inducida. En seguida se desarrollará esto.

En el circuito tanque primario, la corriente de la bobina (I_p) está *atrasada* con respecto a la tensión de la bobina (E_p) debido a que la corriente es *inductiva*. Entonces, la corriente primaria induce una tensión en el circuito secundario (E_i) que está defasada 180 grados con respecto a la tensión primaria, igual que en un transformador ordinario. No obstante, como éste es un circuito sintonizado, la tensión inducida se aplica como tensión de fuente al inductor y al capacitor en serie. Eso hace que la corriente fluya en el circuito secundario (I_s). Pero, en resonancia, el circuito es *resistivo*, de manera que la corriente secundaria (I_s) está en fase con la tensión inducida (E_i).

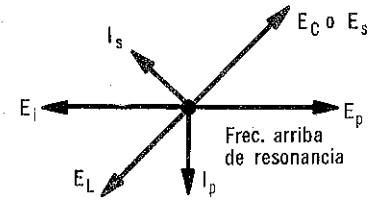


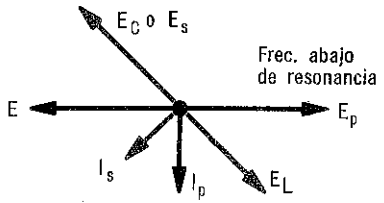
vectores de transformadores resonantes (cont.)





Por lo tanto, las tensiones tienen su caída en el inductor y el capacitor, pero, debido a las relaciones de fase de la corriente y la tensión en estas componentes, la caída en el inductor (E_L) está *adelantada* 90 grados con respecto a la corriente (I_s) y la caída en el capacitor (E_C) está *atrasada* 90 grados con respecto a la corriente (I_s); esto es lo mismo que sucede en un circuito ordinario en serie LC. En consecuencia, la tensión del capacitor (E_C), también estará atrasada 90 grados con respecto a la tensión inducida (E_i). Y, puesto que la tensión inducida (E_i) y la tensión primaria (E_p) están separados 180 grados entre sí, la tensión del capacitor (E_C) está adelantada 90 grados con respecto a la tensión primaria (E_p). Puesto que la tensión de salida o secundaria es en realidad la tensión establecida en el capacitor, en un transformador sintonizado en resonancia la tensión secundaria (E_s) estará adelantada 90 grados con respecto a la tensión primaria (E_p).



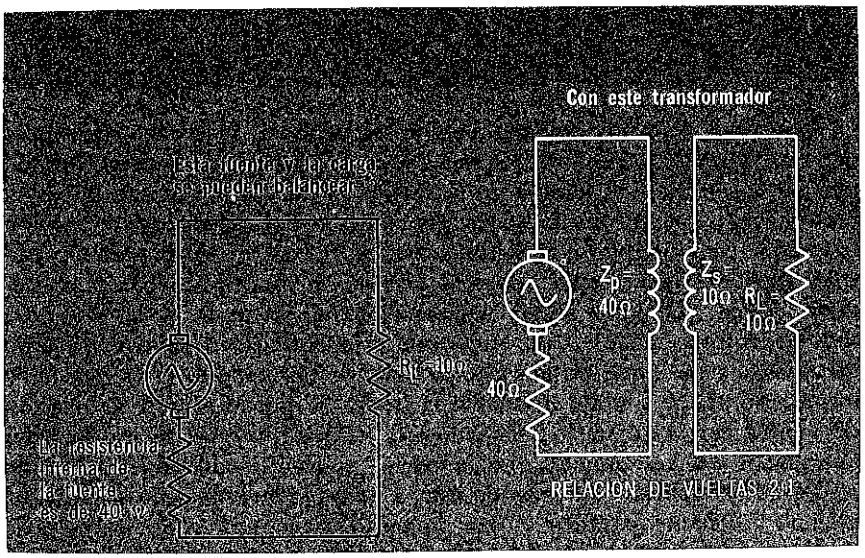


Sin embargo, fuera de resonancia el circuito secundario ya no es resistivo, de manera que la corriente (I_s) no estará en fase con la tensión inducida (E_i). En consecuencia, las tensiones originadas en el inductor y el capacitor estarán más o menos de 90 grados alejadas de E_i, según la lejanía existente entre la sintonización y la resonancia. Puesto que es un circuito resonante en serie, cuanto más baja sea la frecuencia fuera de resonancia, más capacitivo se vuelve y E_s tenderá a diferir 180 grados de E_p. Para las frecuencias más altas, el circuito se vuelve inductivo y E_s se aproximará a la misma fase que E_p.

acoplamiento de impedancia

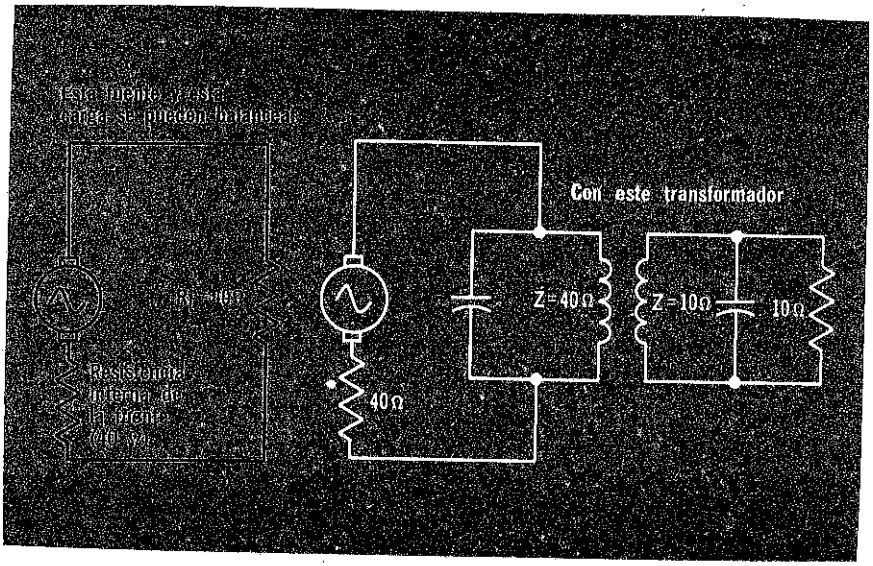
En un circuito eléctrico, la potencia se transmite de la fuente a la carga o cargas. En el caso de un circuito simple con una carga resistiva única, la potencia transmitida será $P = EI = I^2R$, donde R es la resistencia de la carga. Por lo tanto, la potencia depende de la corriente y la resistencia de la carga. Puesto que la corriente aumenta cuando la resistencia de la carga disminuye, se puede pensar que cuanto menor sea la resistencia, mayor será la potencia. Esto es lo que sucedería si no fuese por la resistencia interna de la fuente. La resistencia de la fuente está en serie con la resistencia de carga, de manera que afecta a la corriente y, en consecuencia, a la potencia transmitida a la carga. El efecto combinado de las resistencias de carga y fuente es tal que la potencia máxima es transmitida a la carga cuando la impedancia de carga es igual a la impedancia de la fuente. Cuando las dos impedancias son iguales, se dice que están acopladas. Posteriormente se observará, en trabajos eléctricos que, muy a menudo, una fuente de baja impedancia debe balancearse con una carga de alta impedancia, o viceversa. Esto se podría hacer con la impedancia deseada; pero esto no suele ser práctico. Una forma muy común para acoplar la impedancia de una carga con la impedancia de la fuente es emplear un transformador. Se recordará de lo estudiado en el volumen 3 que la relación de impedancia entre el primario y el secundario de un transformador depende de la relación existente entre sus espiras, según la siguiente ecuación:

$$\sqrt{Z_p/Z_s} = N_p/N_s$$



acoplamiento de impedancia

Por lo tanto, si se usa un transformador con la relación adecuada de espiras es posible obtener los valores que se deseen para las impedancias primaria y secundaria. Si el primario del transformador se conecta a la fuente, sirve como carga para la fuente y tiene la misma impedancia que ésta; entonces se transfiere la máxima potencia al primario. En forma similar, si se conecta el secundario a la carga, sirve como fuente para la carga. Y si la impedancia del secundario es igual a la impedancia de la carga y se transfiere la máxima potencia a la carga.



Obsérvese que los transformadores se utilizan para acoplar impedancias entre la fuente y la carga. Además, los transformadores pueden aumentar o reducir la tensión de la fuente al valor que necesite la carga. Sin embargo, puesto que tanto el acoplamiento de impedancia de tensión dependen en gran parte de la relación de espiras, el transformador con frecuencia se diseña como una *solución intermedia.* Sin embargo, a menudo puede obtenerse mejor acoplamiento si se usan *transformadores sintonizados* o *resonantes.* En estos transformadores, el *devanado* primario generalmente es parte de un circuito tanque en *paralelo* y el devanado secundario es un circuito resonante en serie. Se puede ajustar la relación de espiras para el mejor acoplamiento de tensión, ya que las impedancias apropiadas de los circuitos resonantes se pueden establecer controlando las Q de las bobinas. Además de esto, el *devanado primario* es parte del circuito resonante paralelo y, por lo tanto, tiene una *alta corriente* de tanque, para un mejor acoplamiento inductivo. Y el devanado *secundario* es parte de un circuito resonante en serie, de manera que produce una ganancia de tensión.

resumen

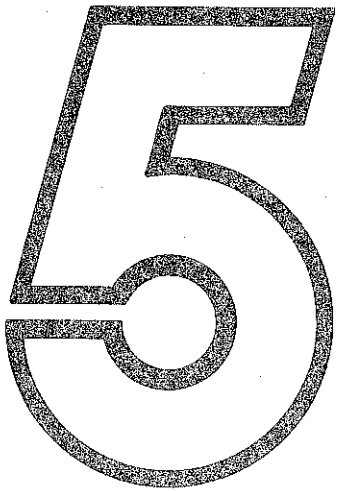
☐ Los circuitos en serie y paralelo RL, RC y LCR, tienen combinaciones tanto en serie como en paralelo, de resistencia, capacitancia e inductancia. Cuando se resuelven circuitos en serie y paralelo deben efectuarse adiciones vectoriales de tensiones, corrientes e impedancias; generalmente se resuelven primero las diversas magnitudes de sus componentes. ☐ Los circuitos sintonizados son circuitos resonantes cuya frecuencia resonante se puede cambiar. Esto se logra haciendo variable el capacitor o el inductor de circuito.

☐ Los circuitos de filtro rechazan tensiones o corrientes de ciertas frecuencias, en tanto que dejan pasar tensiones o corrientes de otras frecuencias. ☐ Los filtros pasabajo pasan todas las frecuencias hasta cierto punto, rechazando todas las que sean más altas. ☐ Los filtros pasaltos rechazan a todas las frecuencias hasta cierto punto y dejan pasar a todas las frecuencias más altas. ☐ Otros tipos de filtro son los de paso de banda y los filtros de rechazo de banda. ☐ Las tensiones y corrientes de un transformador pueden representarse por medio de vectores. Cuando se hace esto, la tensión primaria se usa como referencia de fase. ☐ En transformadores resonantes, las tensiones primaria y secundaria no están defasadas 180° entre sí. En este caso la tensión secundaria está adelantada 90° con respecto a la tensión primaria, en resonancia.

☐ Con frecuencia se usan transformadores para acoplar la impedancia de una fuente, con la de una carga. Este acoplamiento de impedancias se logra usando un transformador que tenga la relación adecuada de espiras. La relación de impedancia entre el primario y el secundario de un transformador depende de la relación de espiras del transformador, según la ecuación $\sqrt{Z_P/Z_S} = N_P/N_S$.

preguntas de repaso

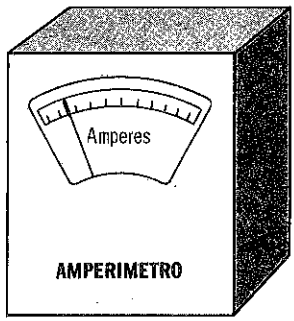
1. ¿Qué es un circuito en *serie y paralelo*, RL, RC, o LCR? Trace un diagrama esquemático que ilustre un circuito de este tipo.
2. Trace otro tipo de circuito en serie y paralelo RL, RC o LCR.
3. ¿Qué es un *circuito sintonizado*? Trace un diagrama esquemático de este tipo de circuito.
4. ¿Por qué se usan los circuitos sintonizados?
5. ¿Qué es un *circuito de filtro*?
6. Trace la curva de respuesta de frecuencia de un filtro de rechazo de banda. Trace la curva de respuesta de frecuencia de un filtro de pasabajo.
7. Describa un filtro simple pasabajo en operación.
8. ¿Qué clase de filtro se obtiene con un capacitor conectado en serie con una carga?
9. Trace un diagrama vectorial para un transformador típico.
10. ¿Qué significa la expresión acoplamiento de impedancias? ¿Por qué es importante?

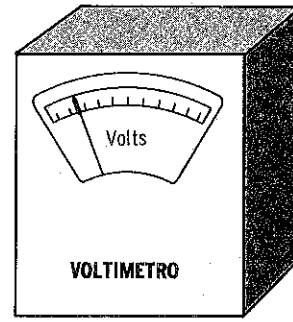


Introducción — Mecanismos del medidor — Estructura del medidor — Características del medidor — Medidores de c-c y c-a — Medidores con rectificador — Calibración y precisión de los medidores — Rangos de los amperímetros — Amperímetros de alcance múltiple — Medición de corriente — Voltímetros — Ohmímetros — Puente de Wheatstone — Magohmímetro — Medidores de potencia — Multímetros — Voltímetro de tubo al vacío.

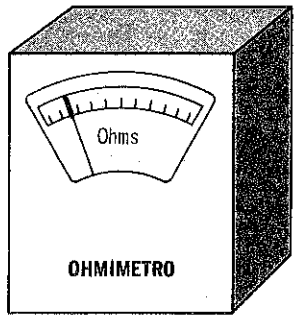
necesidad de equipo de prueba

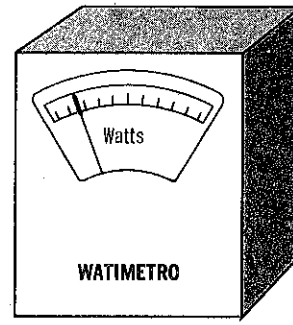
Ya sea que se diseñe, instale, opere o repare equipo eléctrico, debe conocerse la forma en que se miden diversas cantidades eléctricas, como por ejemplo frecuencia, potencia, factor de potencia, impedancia, distorsión, sensibilidad, corriente, tensión y resistencia. Desde luego, el lector conoce algunas de estas cantidades; pero en el presente estudio de electricidad aprenderá los términos de *corriente, tensión, resistencia* y *potencia.* En la mayor parte de los casos estas cuatro magnitudes son las más importantes de las que deben medirse.





Es necesario saber cómo se usan los cuatro medidores básicos y tener un entendimiento completo de su forma de funcionar





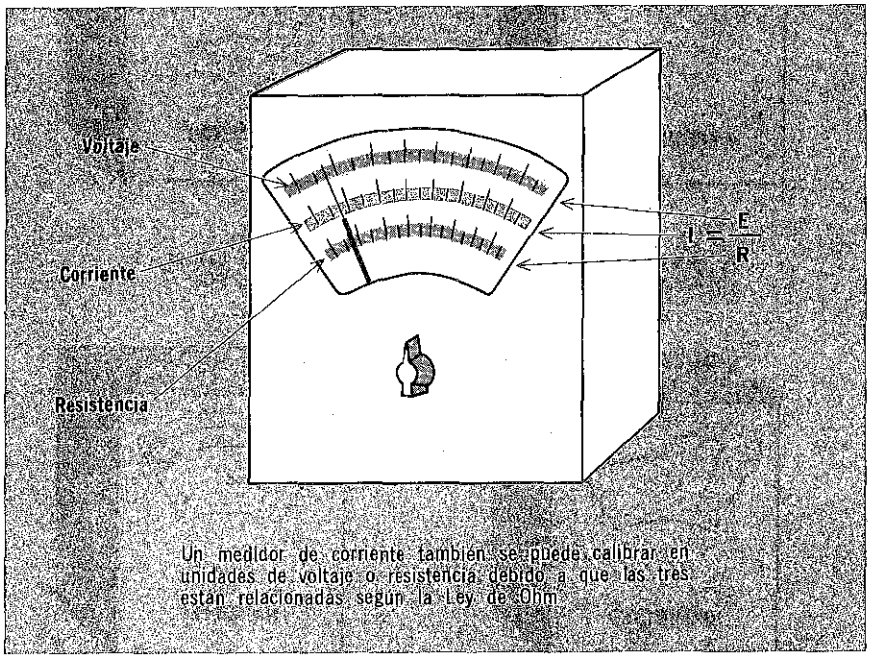
Los medidores son aquellos aparatos que se usan comúnmente para medir corriente, tensión, resistencia y potencia. Conviene conocer la forma en que conectan los medidores a los circuitos para hacer determinada medición; pero es igualmente importante que se *comprenda cómo funciona el instrumento,* a fin de interpretar adecuadamente la medición.

el medidor básico

Excepto algunos medidores, todos los que funcionan según principios electrostáticos, sólo pueden medir la cantidad de corriente que pasa por ellos. Sin embargo, se pueden calibrar de manera que indiquen casi cualquier cantidad eléctrica. Por ejemplo, se sabe que, según la ley de Ohm, la corriente que fluye a través de un medidor es determinada por la tensión que se aplique al medidor y por la resistencia del mismo.

$$I = E/R$$

Así pues, para determinada resistencia del medidor, valores diferentes de tensión aplicada producirán el flujo de valores específicos de corriente. Como resultado, aunque el medidor mida en realidad la corriente, la escala se puede calibrar en unidades de tensión.



Un medidor de corriente también se puede calibrar en unidades de voltaje o resistencia, debido a que las tres están relacionadas según la Ley de Ohm.

En forma similar, para una tensión aplicada, diferentes valores de resistencia harán que fluyan valores específicos de corriente. Por lo tanto, la escala del medidor se puede calibrar también en unidades de resistencia en lugar de en unidades de corriente. Lo mismo ocurre con la potencia, ya que ésta es proporcional a la corriente:

$$P = EI \quad \text{o} \quad P = I^2R$$

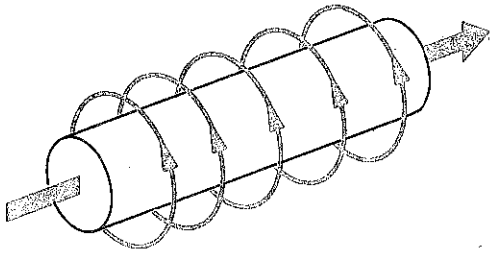
el medidor de corriente

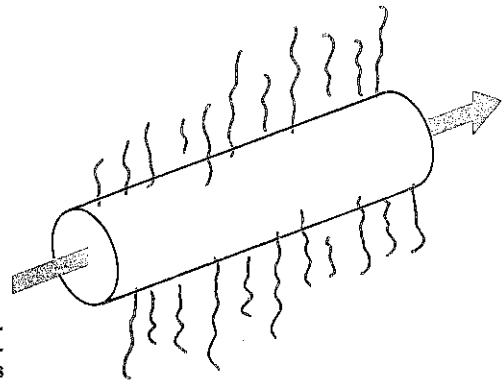
Según se ha estudiado en los volúmenes 1 y 2, cuando fluye corriente a través de un conductor, produce dos efectos:

1. Origina un *campo magnético* alrededor del conductor.
2. Genera *calor* en el conductor.

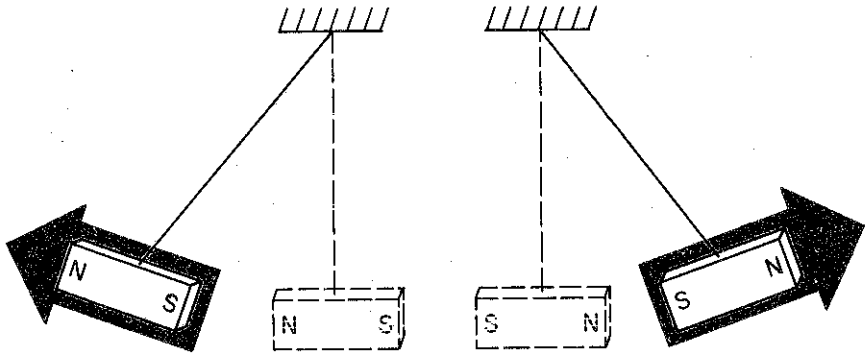
La cantidad de corriente que fluye a través del conductor determina la intensidad del campo magnético y la cantidad de calor producida. Estos efectos se usan en los dos tipos básicos de medidores de corriente: el medidor de corriente electromagnético y el medidor de corriente térmico. De acuerdo con sus nombres, se puede apreciar que el electromagnético mide la cantidad de flujo de corriente por medio del campo magnético, en tanto que el térmico lo hace con base en el calor producido por el flujo de corriente.

Para medir la corriente, el medidor de corriente de tipo electromagnético emplea un campo magnético alrededor de un alambre que lleva corriente.





Para medir la corriente, el medidor térmico de corriente utiliza el calor producido por la corriente que pasa a través de un alambre.

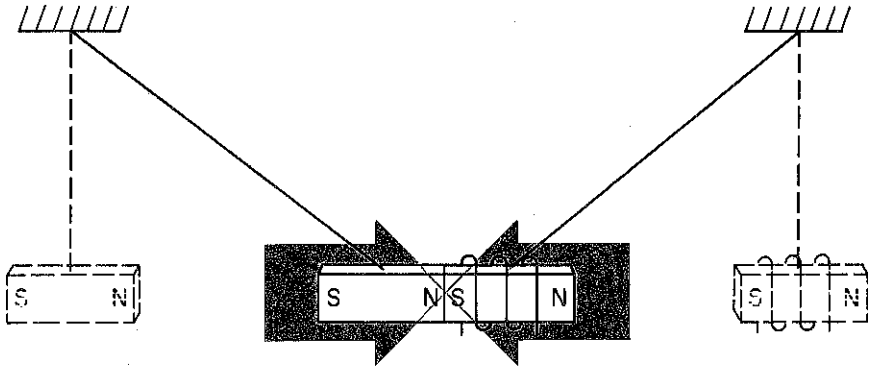


Polos magnéticos del mismo signo se repelen

repaso de electromagnetismo

Indudablemente, el medidor electromagnético de corriente es el que se usa con más frecuencia para medir corriente, tensión, resistencia y potencia. Es fácil comprender el funcionamiento de este tipo de medidor si se conocen los principios magnéticos básicos según los cuales funciona el instrumento. Estos principios se estudiaron en el volumen 1; sin embargo, a continuación se presentará un breve repaso.

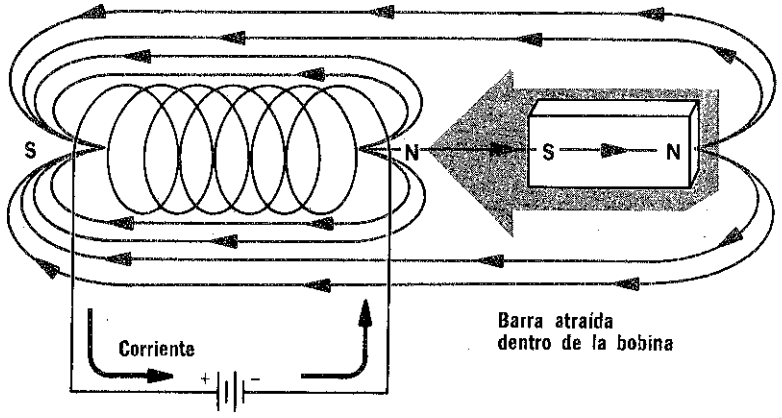
Los campos magnéticos interactúan en varias formas: por ejemplo, polos iguales de dos imanes de hierro se repelen y polos diferentes se atraen. Lo mismo ocurre con los polos iguales y diferentes de los electroimanes. Además, un imán de hierro y un electroimán se repelerán si están colocados de tal manera que sus polos semejantes estén uno frente a otro y se atraerán cuando polos diferentes estén uno frente al otro.



Polos magnéticos de distinto signo se atraen

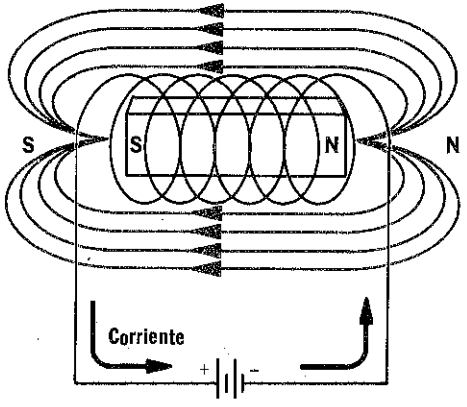
atracción

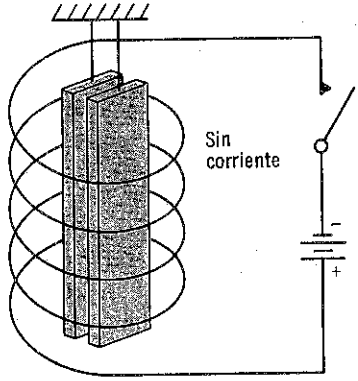
Si se coloca una barra de hierro dulce cerca de un solenoide magnetizado, la barra de hierro se magnetizará. Las líneas de fuerza magnéticas originadas en el hierro se alinearán en la misma dirección que las del solenoide. Como resultado, los polos inducidos en la barra de hierro también estarán en la misma dirección. Por lo tanto, cada uno de los polos del solenoide y de la barra de hierro queda frente a un polo opuesto. Puesto que polos opuestos se atraen, la barra de hierro será atraída hacia la bobina. El medidor de hierro móvil de tipo de émbolo —que se estudiará más adelante— se basa en este principio particular.



Debido a que los polos de signo diferente se atraen, la barra de hierro se magnetizará con las polaridades indicadas y será atraída al interior de la bobina

Una vez que la barra se mueve hacia la bobina, el campo magnético se concentra en la barra misma



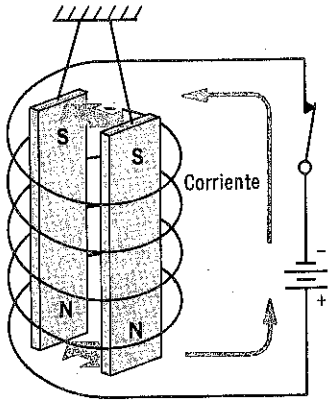


Cuando no hay corriente en la bobina, no se origina campo magnético y las barras de hierro no se mueven

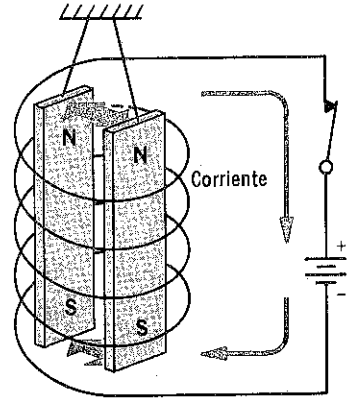
repulsión

Ahora suponga que se colocan paralelamente dos barras de hierro dulce dentro de una bobina en espiral para observar lo que sucede. Cuando la bobina se magnetiza, ambas barras se magnetizan con la misma polaridad. Debido a esto, tendrán polos similares uno frente a otro; y como polos similares se repelen, las barras tienden a separarse.

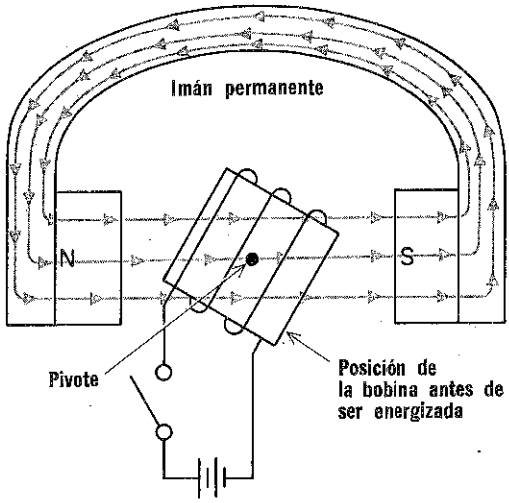
Cuando se invierte la corriente en la bobina, la polaridad de las barras también se invierte pero siguen teniendo polos iguales unos frente a otros. Este principio de que polos iguales se repelen tiene aplicación en el medidor de hierro móvil de tipo de repulsión, el cual se estudiará posteriormente.



Cuando hay corriente en la bobina, ambas barras se magnetizan con la polaridad repeliéndose



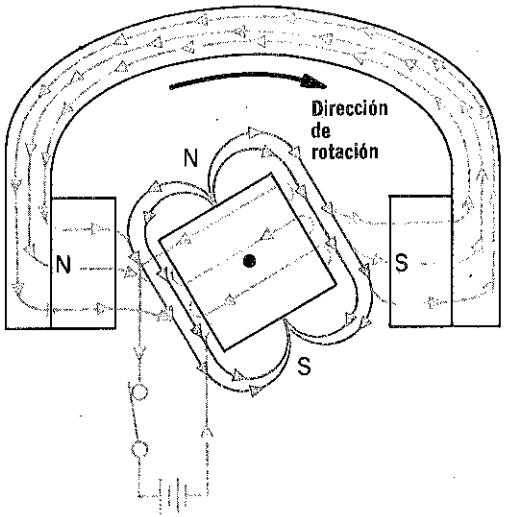
Cuando la corriente fluye en la bobina en la dirección opuesta, se invierten las polaridades norte y sur de las barras, pero éstas siguen repeliéndose



Antes de energizar la bobina, permanece en su posición normal (ligeramente inclinada). El campo magnético permanente no tiene efecto sobre la posición de la bobina

repulsión (cont.)

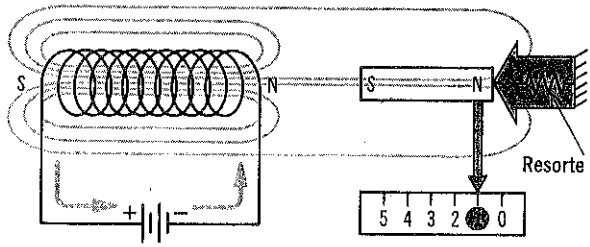
En los dos ejemplos de interacción de campo magnético que se han estudiado hasta ahora, la bobina permanece estacionaria y el imán de hierro se mueve. Pero si la bobina se hace girar entre los polos de un imán permanente estacionario, entonces se magnetiza y se produce una interacción entre los polos magnéticos del imán permanente de la bobina, haciendo que la bobina gire. Los medidores de bobina móvil funcionan según este principio y se estudiarán posteriormente.



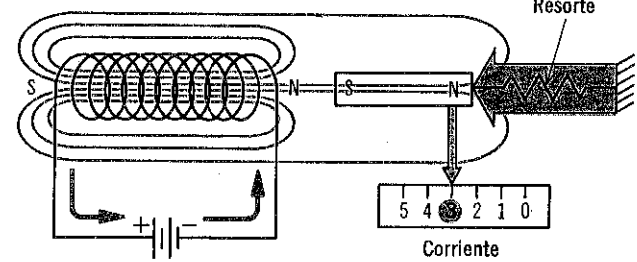
Cuando la bobina es energizada, se origina un campo dentro de la bobina. El campo es tal que los polos iguales del imán y de la bobina quedan frente a frente haciendo que esta última gire sobre su pivote

forma en que las corrientes afectan a un campo magnético

Se ha estudiado cómo un campo magnético interactúa con otro. Sin embargo, hasta ahora no se ha hablado de lo que controla la magnitud de dicha interacción. Se sabe que la corriente que fluye a través de una bobina produce el campo magnético que rodea a la bobina. La *intensidad* del *campo magnético* es proporcional a la *cantidad de corriente* que fluye a través de la bobina. Al aumentar la corriente, la intensidad del campo magnético también aumenta y, al disminuir la corriente, también disminuye la intensidad del campo magnético. Por ejemplo, si la corriente que fluye a través de cierta bobina aumenta de 1 a 1.6 amperes, el campo magnético que se produce alrededor de la bobina será de mayor intensidad para 1.6 amperes que para 1 ampere.



El agregar una aguja a la barra y el incorporar una escala calibrada, permite medir la corriente, ya que ésta será proporcional a la distancia a que se mueva la barra

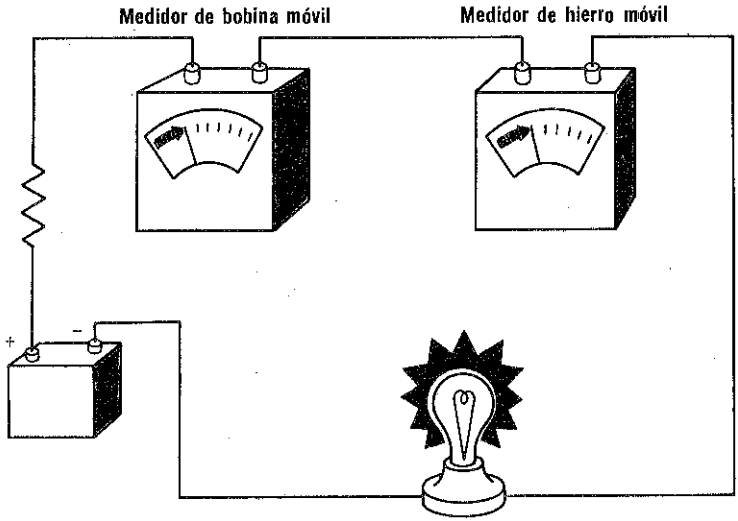


Al aumentar la corriente en la bobina, la intensidad de su campo magnético aumenta, atrayendo a la barra de hierro más hacia la bobina

Ahora suponga que se ajusta un resorte a la barra de hierro de manera que tienda a restringir su movimiento; en consecuencia, el campo magnético tendrá que vencer la tensión del resorte. Cuanto más intenso sea el campo, tendrá que vencer mayor tensión del resorte. Por lo tanto, cuanto mayor sea la corriente que fluye en la bobina, mayor será el campo magnético y más atracción ejercerá la bobina sobre la barra de hierro. Cuanto más corriente fluya a través de una bobina puesta alrededor de dos barras de hierro —como en las páginas 5-6— mayor repulsión se producirá entre las barras. En forma similar, la bobina móvil —páginas 5-7— girará más al aumentar la corriente a través de la bobina. Todos los medidores de corriente electromagnéticos funcionan de acuerdo con el principio de que la intensidad del campo magnético en una bobina es *proporcional* a la cantidad de corriente que fluye por ella.

tipos de medidores de corriente electromagnéticos

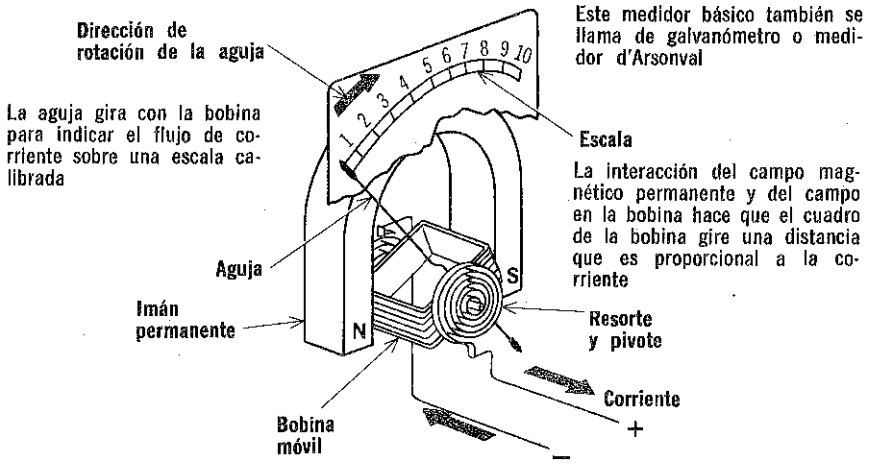
El lector ya sabe la forma en que pueden utilizarse los campos magnéticos para producir movimientos entre objetos magnetizados; y también se ha dicho que el movimiento es proporcional a la intensidad del campo magnético, la cual, a su vez, es proporcional a la corriente que produce el campo. Ahora se verá cómo se usan estos efectos para medir corriente eléctrica.



Ambos medidores se basan en principios magnéticos ligeramente diferentes para medir la corriente que pasa por la lámpara

Actualmente se usan dos tipos básicos de medidor de corriente electromagnético según su funcionamiento: el de *bobina móvil* y el de *hierro móvil*. Ambos funcionan a base de electromagnetismo; pero hay ligeras diferencias en la forma en que cada uno de los dos usa los campos magnéticos para indicar la cantidad de corriente que fluye en un circuito. Además, cada tipo de medidor tiene ciertas ventajas y desventajas, las cuales se estudiarán posteriormente.

Nótese que, con sólo mirarlos o usarlos, no es fácil señalar la diferencia existente entre los distintos tipos de instrumento. Exteriormente tienen la misma apariencia y generalmente se usan de la misma manera para hacer mediciones de corriente; pero cuando se sabe cómo trabaja cada tipo de medidor, es fácil identificarlos analizando su funcionamiento.



mecanismo del medidor de bobina móvil

En 1882, el francés Arsene d'Arsonval, inventó el *galvanómetro,* dándole ese nombre en honor del científico italiano Galvani. Básicamente, el medidor era un dispositivo que constaba de un imán estacionario permanente y una *bobina móvil.* Aunque el primer galvanómetro era muy preciso, sólo podía medir cantidades muy pequeñas y era muy delicado. En el transcurso de los años, se hicieron muchas mejoras que ampliaron la capacidad de medición de los aparatos y los hicieron con estructuras más sólidas (hasta la fecha, al galvanómetro de bobina móvil se le conoce con frecuencia como medidor de d'Arsonval).

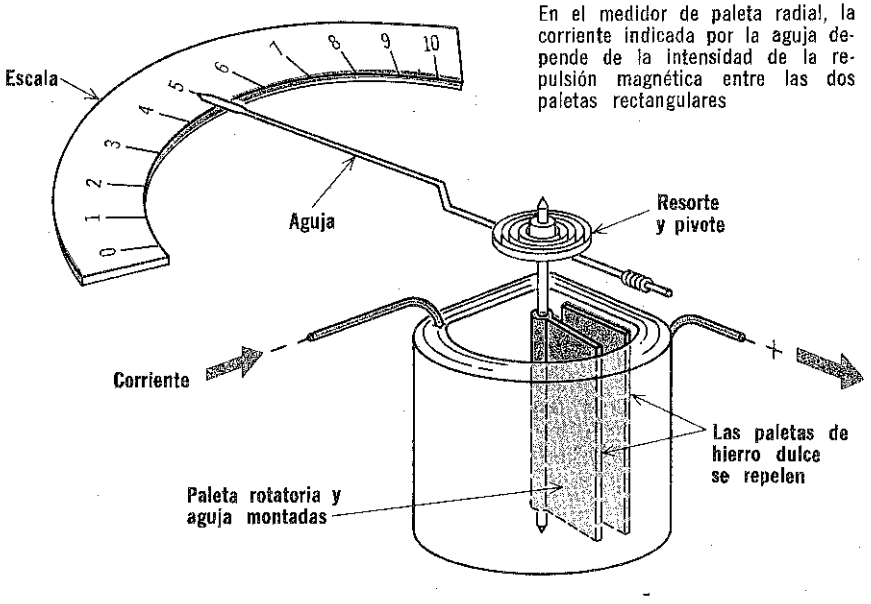
Debido a que es muy preciso y su estructura muy sólida, el medidor de bobina móvil es decididamente el tipo de medidor más usado en la actualidad. Este medidor básico se usa para medir corriente, tensión, resistencia y muchas otras magnitudes eléctricas. Por lo tanto, cualquiera que estudie electricidad necesita comprender correctamente cómo funciona el medidor de bobina móvil.

El medidor de bobina móvil funciona a base del efecto electromagnético descrito en la página 5-7. En su forma más sencilla, el medidor de bobina móvil consta de una bobina de alambre muy fino, el cual está devanado sobre un marco de aluminio ligero. Un imán permanente rodea cada bobina. El marco de aluminio está montado sobre pivotes que le hacen posible girar libremente, junto con la bobina, entre los polos del imán permanente. Cuando hay corriente en la bobina, ésta se magnetiza y la polaridad de la bobina es tal que la repele el campo del imán permanente. Esto hace que el marco de la bobina gire sobre sus pivotes y la distancia que gire depende de la cantidad de corriente que fluya a través de la bobina. Por lo tanto, al ajustar una aguja al marco de la bobina y una escala calibrada en unidades de corriente, puede medirse la cantidad de corriente que fluye a través del instrumento.

mecanismo del medidor de hierro móvil

En el repaso sobre electromagnetismo se estudió cómo dos barras de hierro dulce se repelían cuando se colocaban dentro de una bobina electromagnética magnetizada. Este efecto se aplica en los medidores de hierro móvil para medir corriente eléctrica. Existen tres tipos de medidores de hierro móvil: 1) el de *paleta radial,* 2) el de *álabes concéntricos* y 3) el de *émbolo.*

Básicamente, los medidores de paleta radial, funcionan a base de dos piezas *rectangulares* de hierro dulce, llamadas *paletas,* rodeadas de una bobina. Una paleta es fija y la otra puede girar libremente sobre una de sus aristas, la cual está fijada sobre pivotes. Se llaman *paletas radiales* debido a que la paleta fija al pivote gira como un radio de un círculo. La paleta que gira tiene una aguja unida a ella. Cuando hay flujo de corriente en la bobina, se establece un campo magnético alrededor de ésta y el campo magnético, a su vez, induce en ambas paletas un campo magnético de la misma polaridad. Esto hace que las paletas se repelan y la móvil, junto con la aguja, gira una distancia proporcional a la corriente que pasa por la bobina. Igual que en el medidor de bobina móvil, para indicar la corriente que fluye por el instrumento la aguja se mueve frente a una escala calibrada en unidades de corriente.



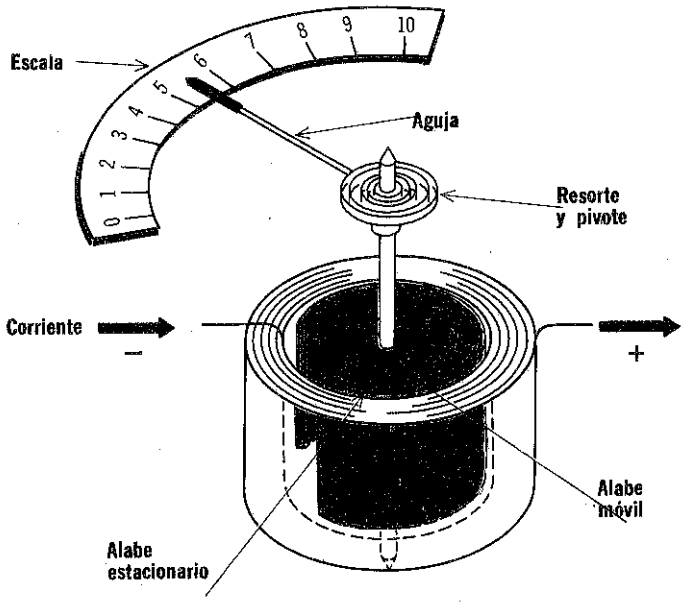
En el medidor de paleta radial, la corriente indicada por la aguja depende de la intensidad de la repulsión magnética entre las dos paletas rectangulares

A su vez, la intensidad de la repulsión magnética, depende de la corriente que pasa por la bobina

mecanismo del medidor de álabes concéntricos

El medidor de *álabes concéntricos* funciona en forma similar al medidor de paleta radial. Las únicas diferencias existentes entre ambos medidores están en las formas de las paletas y los álabes, y en sus posiciones relativas.

Los álabes del medidor de álabes concéntricos son de forma *semicircular* y uno de los dos está colocada paralelamente a la otra. Los álabes son como segmentos de dos círculos de diferente tamaño con un centro común. Es decir, son *concéntricos*. El *álabe interior* puede *girar* con respecto a este punto central.

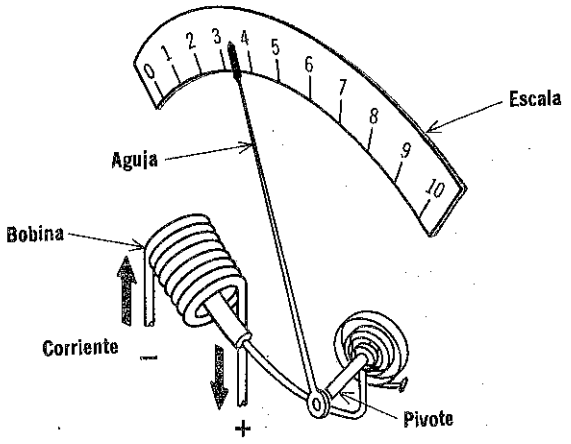


La repulsión magnética entre dos álabes semicirculares hace que el interior gire y mueva a la aguja, lo cual indica la corriente que pasa por la bobina

Igual que en el caso de mecanismo del medidor de paleta radial, el flujo de corriente a través de la bobina origina campos magnéticos de la misma polaridad en ambos álabes. La distancia que gira el álabe libre depende de la cantidad de la corriente que fluye a través de la bobina y la aguja indica esa cantidad de corriente sobre una escala calibrada.

mecanismo del medidor de émbolo móvil

El mecanismo del medidor de *émbolo* consiste básicamente en un núcleo móvil de hierro dulce colocado parcialmente en el interior de una bobina fija. El núcleo se conecta a un brazo que está sobre un pivote que le permite girar, entrando y saliendo de la bobina; hay una aguja conectada en el mismo punto que el pivote, de manera que gira igual que el émbolo. Cuando hay corriente a través de la bobina, se origina un campo magnético alrededor de la bobina. Según se explicó en el repaso sobre electromagnetismo, esto hace que el núcleo se magnetice y sea más atraído por la bobina. La distancia que el núcleo se mueva con respecto a la bobina, dependerá de la cantidad de corriente que fluya a través de ella. Puesto que la aguja está unida al pivote del émbolo, su movimiento frente a una escala calibrada sirve para indicar la cantidad de corriente que fluye a través de la bobina.



La corriente en la bobina origina un campo magnético que atrae al núcleo de hierro hacia dentro de la bobina. La magnitud de la corriente es indicada por la aguja, que está montada sobre el eje del pivote

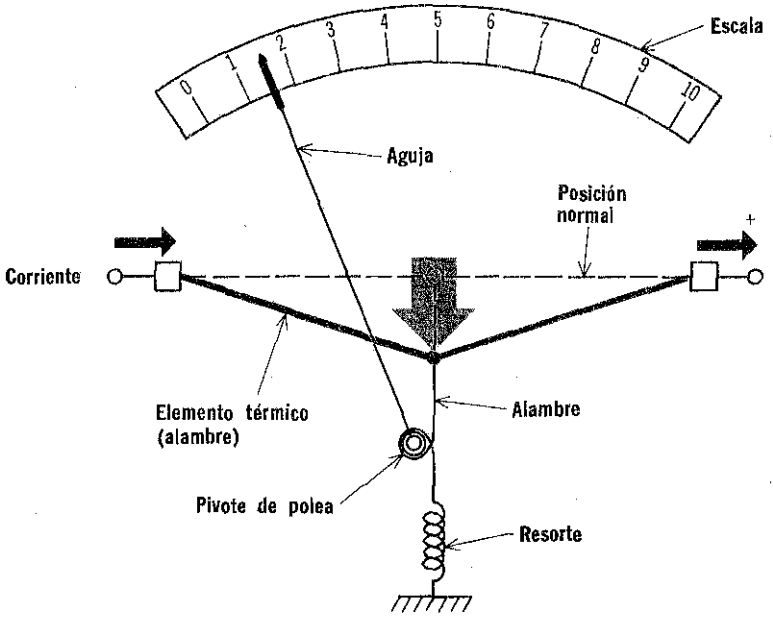
El medidor de tipo émbolo fue el primer medidor de hierro móvil que se inventó. Sin embargo, rara vez se usa en la actualidad debido a que no es tan preciso ni tan sensible como los demás tipos de medidores de hierro móvil que se originaron con posterioridad. Por lo tanto, en este libro no se estudia detalladamente tal aparato.

amperímetro térmico

En el volumen 2, se vio que un alambre se calienta cuando fluye corriente a través de él. También se explicó que la cantidad de calor aumenta al aumentar la corriente. El amperímetro térmico aprovecha este efecto para medir la corriente.

Un alambre se expande cuando se calienta. Cuanto más se calienta el alambre, más se expande. Por lo tanto, mientras mayor sea la corriente que pasa por el alambre, mayor será la expansión de éste. Si se

Cuando la corriente fluye por el alambre, la temperatura de este último aumenta en forma proporcional a la intensidad de la corriente. En consecuencia, el alambre se dilata proporcionalmente a la magnitud del aumento de temperatura



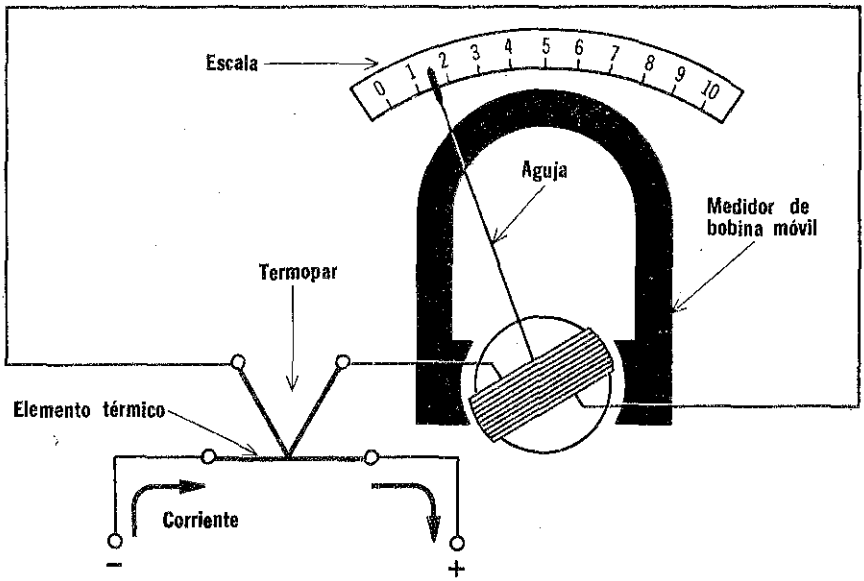
Cuando el elemento térmico se dilata, queda menos estirado y el resorte y el otro alambre tiran de él hacia abajo. El resorte y el alambre están sujetos al pivote de la polea de manera que también harán que la aguja se mueva para indicar el flujo de la corriente

unen un segundo alambre y un resorte al alambre por el que fluye la corriente, siempre que éste se expanda por el calor el otro alambre y el resorte lo jalarán, sacándolo de su posición normal. Si se conecta una aguja al segundo alambre, la aguja también se moverá al expanderse el alambre que conduce corriente. La distancia hasta donde se mueve la aguja indica la cantidad de corriente que fluye a través del alambre.

medidor de termopar

Anteriormente se han estudiado medidores que funcionan ya sea a base de efectos electromagnéticos, o bien de efectos térmicos. El medidor de termopar aprovecha *ambos* efectos para medir la corriente. Básicamente, es una combinación de amperímetro de alambre caliente y medidor de bobina móvil, a los que se les ha añadido un dispositivo que se conoce como *termopar*.

De acuerdo con lo estudiado en el volumen 1 respecto a termoelectricidad, se sabe que un termopar consta de dos metales distintos que, al unirse, producen una fem cuando se calienta la junta.



La corriente del elemento térmico calienta tanto a este alambre, como a la unión del termopar. Así se produce un pequeño voltaje de c-c en los extremos libres del termopar, lo cual hace que el medidor de bobina móvil indique la corriente que pasa por el elemento térmico.

El mecanismo de este medidor tiene un calentador que generalmente es un elemento térmico, el cual está conectado a la junta del termopar. Como puede apreciarse en la figura, la corriente que ha de medirse pasa a través del calentador de termopar o alambre caliente. Como en el caso del amperímetro térmico, éste alcanza una temperatura que depende de la cantidad de corriente que fluye. El alambre calienta entonces la unión del termopar y éste a su vez, origina una pequeña tensión de c-c. Esta tensión hace que fluya una corriente a través del mecanismo de bobina móvil para indicar la cantidad de corriente que fluye a través del elemento térmico.

resumen

☐ Prácticamente todos los medidores de corriente miden sólo la corriente que fluye a través de ellos. Sin embargo, se pueden utilizar para medir tensión, resistencia y potencia, calibrando la escala del medidor para dichas magnitudes. ☐ Existen dos tipos básicos de medidores de corriente: el electromagnético y el térmico. ☐ El medidor electromagnético, que es el más usado, funciona a base de campos magnéticos que interactúan entre sí. ☐ El medidor de corriente térmico aprovecha el calor que produce el flujo de corriente en un alambre.

☐ El medidor de bobina móvil es el tipo de medidor que más se usa actualmente. También recibe el nombre de galvanómetro, en honor del científico italiano Galvani. ☐ El medidor de bobina móvil consta de una bobina de alambre delgado montada sobre un marco de aluminio y colocada entre los polos de un imán permanente. El cuadro de la bobina gira libremente. ☐ Cuando una corriente produce un campo magnético alrededor de la bobina del medidor, la bobina gira, ya que la repele el campo del imán permanente. ☐ Una aguja se fija al cuadro de la bobina en el medidor de bobina móvil. Cuando la bobina gira, mueve a la aguja frente a una escala calibrada.

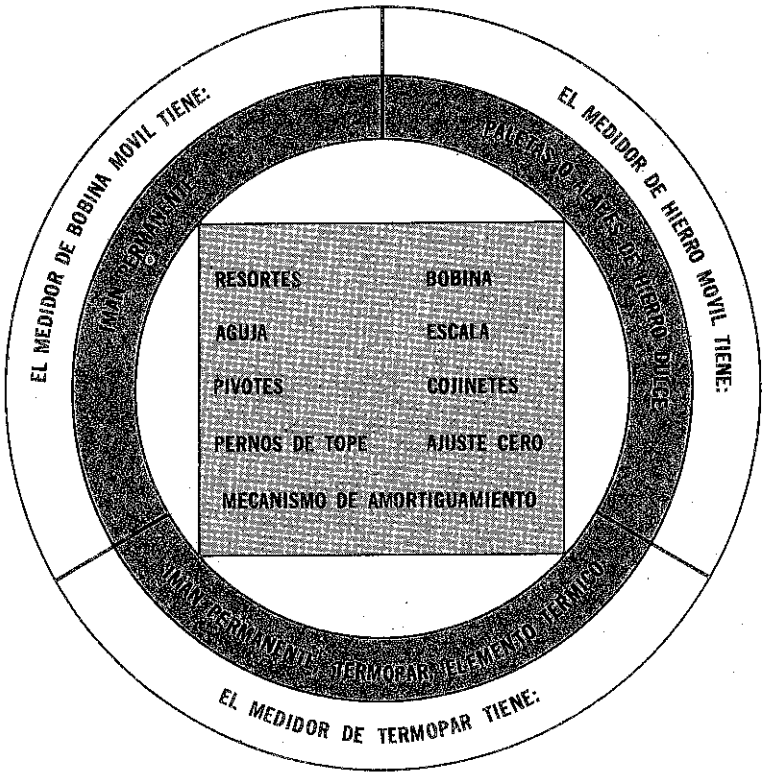
☐ En los medidores de hierro móvil, la bobina que conduce corriente es etacionaria. ☐ Los tipos de medidores de hierro móvil de paleta radial y de álabes concéntricos disponen de paletas o álabes de hierro dulce colocados dentro de la bobina. Cuando la bobina produce un campo magnético, hace girar a una de las paletas. La cantidad de revoluciones de la paleta o del álabe depende de la intensidad del campo magnético de la bobina, que a su vez depende de la cantidad de corriente que fluye por ella. ☐ En el medidor de émbolo móvil, un núcleo móvil gira introduciéndose y saliendo de la bobina, debido a la influencia del campo magnético de la bobina. ☐ El amperímetro térmico es un medidor de tipo térmico. Funciona según el principio de que un alambre se expande cuando se calienta por el paso de una corriente. ☐ El medidor de termopar aprovecha los efectos tanto electromagnéticos como térmicos de la corriente.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo puede un medidor de corriente medir tensión y resistencia?
2. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de medidores de corriente?
3. Si se aumenta la corriente en una bobina, ¿qué sucede con el campo magnético que la rodea?
4. Dibuje el mecanismo básico de un medidor de bobina móvil.
5. ¿Qué otro nombre se le da a un medidor de bobina móvil?
6. ¿Cuáles son los tres tipos de mecanismos de los medidores de hierro móvil?
7. Dibuje el mecanismo básico de un medidor de émbolo móvil.
8. Dibuje un amperímetro térmico básico.
9. ¿Qué es un *termopar*?
10. Describa brevemente un medidor de termopar.

partes del mecanismo de un medidor

Aunque todos los mecanismos básicos de los medidores que se han estudiado hasta ahora funcionan de acuerdo con diferentes principios eléctricos, su estructura fundamental es similar. Todos tienen las siguientes partes básicas: 1) una bobina, 2) una aguja, 3) una escala, 4) pivotes, 5) cojinetes, 6) resortes, 7) pernos de retención, 8) un tornillo de ajuste cero y 9) un mecanismo amortiguador.



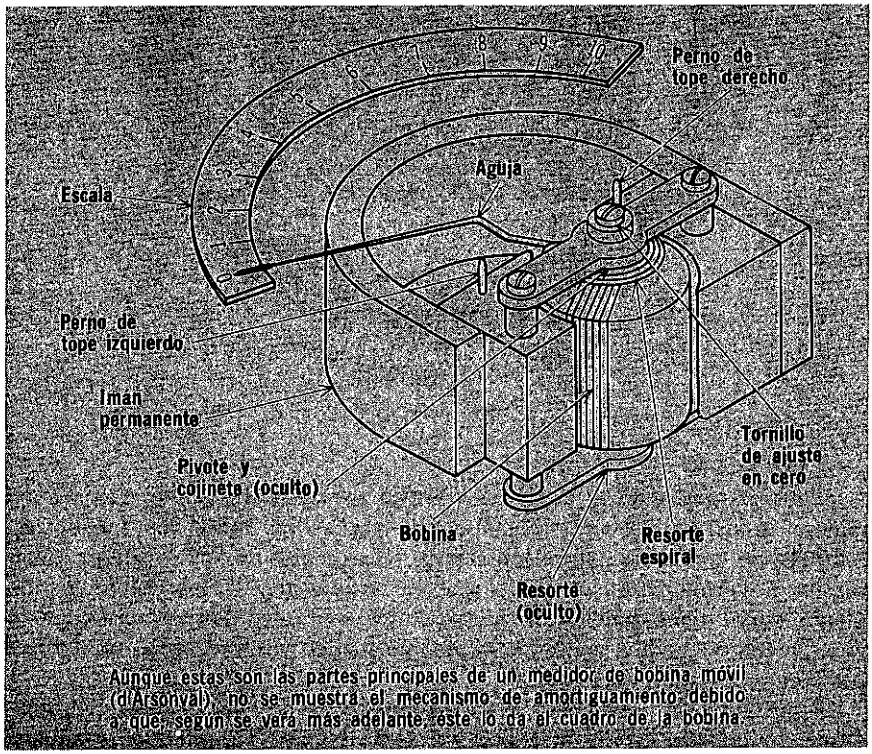
Con excepción de la bobina, la escala y el mecanismo de amortiguamiento, estas partes son esencialmente iguales en todos los medidores. Además de tener las partes anteriores, el mecanismo del medidor tiene un imán permanente, en tanto que el mecanismo de los medidores de hierro móvil tiene paletas de hierro dulce. Un medidor de termopar es idéntico al de bobina móvil, excepto porque el primero tiene un termopar y un elemento térmico.

En seguida se verá cómo es la estructura de los mecanismos de medidores de bobina móvil, hierro móvil y termopar. También se estudiará la función de cada una de las partes principales de estos mecanismos.

mecanismo del medidar de bobina móvil (d' arsonval)

El mecanismo del medidor bobina móvil ilustrado anteriormente se presentó simplificado para ayudar al lector a familiarizarse con los principios de su funcionamiento. En realidad, como se puede apreciar, el mecanismo de bobina móvil tiene muchas más partes que las mostradas inicialmente.

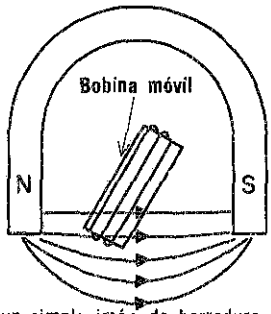
En la siguiente figura aparecen todas las partes principales de un medidor de bobina móvil. El lector recordará que el imán permanente suministra el campo magnético uniforme dentro del cual gira la bobina móvil. Se transmite la corriente que debe medirse a la bobina móvil y produce un campo magnético alrededor de ésta; este campo magnético interactúa con el del imán permanente, haciendo que la bobina gire. La aguja conectada a la bobina también gira frente a la escala calibrada, indicando la cantidad de corriente que fluye. Cuanto mayor sea la corriente, más intenso será el campo magnético de alrededor de la bobina, la bobina girará más y será mayor la distancia que recorra la aguja frente a la escala del instrumento.



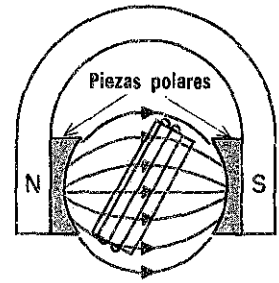
Aunque estas son las partes principales de un medidor de bobina móvil (d'Arsonval), no se muestra el mecanismo de amortiguamiento debido a que, según se verá más adelante, éste lo da el cuadro de la bobina.

imanes permanentes

El medidor de bobina móvil dispone de un imán permanente en forma de herradura. La bobina móvil está colocada dentro del campo magnético que hay entre los dos polos del imán. Sin embargo, si se usara un imán *simple* de herradura, muchas de las líneas magnéticas de fuerza no cortarían a la bobina móvil. Pero, según se recordará del estudio de magnetismo en el volumen 1, las líneas magnéticas de fuerza viajan siguiendo la trayectoria de menor resistencia. También téngase presente que el hierro dulce ofrece menos resistencia que el aire a las líneas de fuerza. Por lo tanto, se montan *piezas polares* de hierro dulce sobre los polos del imán, con objeto de concentrar las líneas de fuerza entre los polos magnéticos.



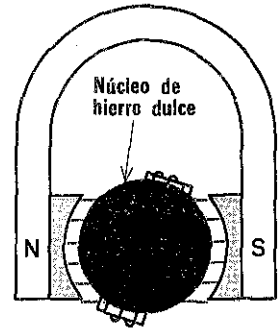
Con un simple imán de herradura, muchas de las líneas de fuerza, no cortarían a la bobina



Las piezas polares concentran las líneas de fuerza entre los dos polos. Por lo tanto, habrá más líneas de fuerza que corten a la bobina

Para concentrar aún más las líneas de fuerza entre los polos de un imán, se coloca un núcleo circular de hierro dulce entre las piezas polares. El núcleo no solamente origina un campo magnético uniforme y muy intenso entre los polos, sino que también actúa como *conservador*, para ayudar al imán permanente a conservar su magnetismo. La bobina móvil gira alrededor del núcleo de hierro dulce, el cual está fijo.

Un imán de herradura con piezas polares y un núcleo de hierro tiene un campo magnético concentrado y uniforme en el entrehierro. Por lo tanto, la mayor parte de las líneas de fuerza cortan a la bobina

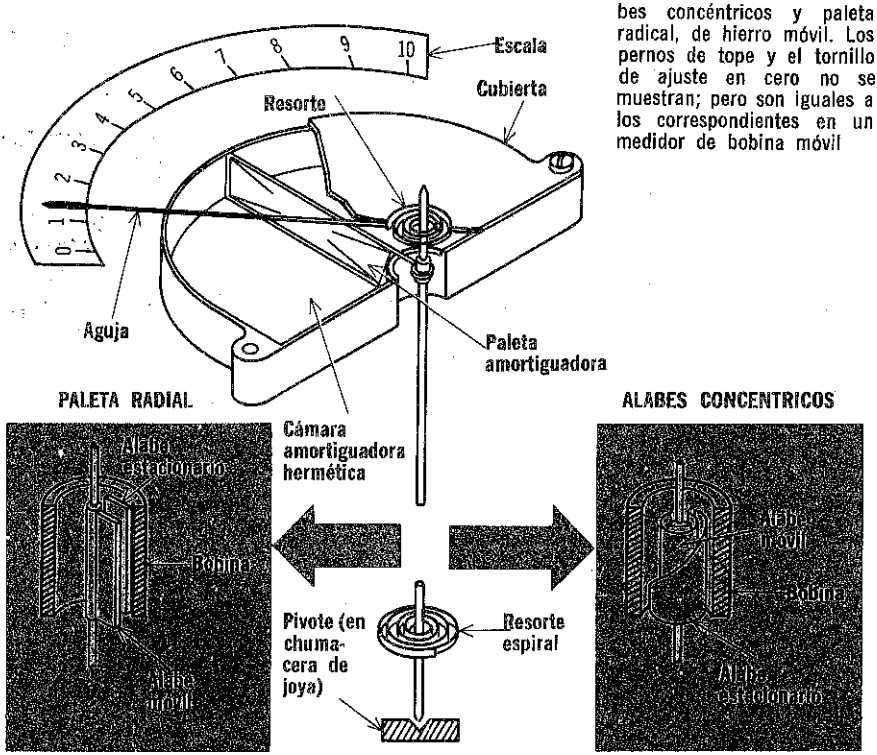


medidores de hierro móvil

En la página 5-17 se señaló que el mecanismo de los medidores de bobina móvil y de hierro móvil tienen esencialmente las mismas piezas, excepto porque el medidor de bobina móvil tiene un imán permanente y el otro tiene barras de hierro móviles.

Ahora se estudiará el medidor de hierro móvil y sus paletas de hierro, para luego estudiar todas las partes que son comunes a ambos tipos de medidores.

Se recordará que un medidor de hierro móvil tiene dos paletas montadas dentro de una bobina. Una paleta es fija y la otra, con una aguja montada sobre ella, puede girar libremente. La corriente que pasa a través de la bobina induce un campo magnético de la misma polaridad en ambas paletas. Por lo tanto, la paleta fija repele a la paleta libre que gira una distancia que depende de la intensidad del campo magnético y, por lo tanto, de la intensidad de la corriente. La aguja que está montada sobre la paleta libre también gira, moviéndose frente a una escala calibrada, de manera que indica la cantidad de corriente que fluye.

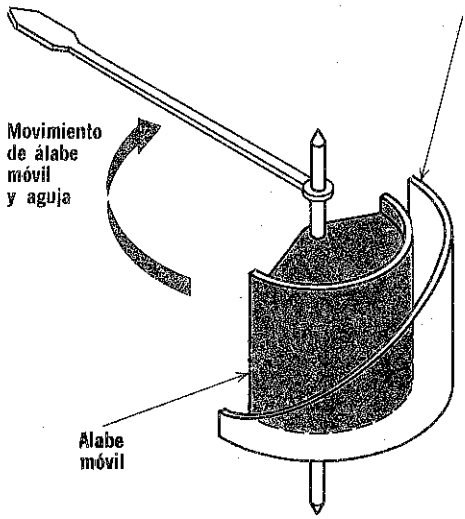


Estas son las partes principales de los medidores de álabes concéntricos y paleta radical, de hierro móvil. Los pernos de tope y el tornillo de ajuste en cero no se muestran; pero son iguales a los correspondientes en un medidor de bobina móvil

paletas y álabes de hierro

La diferencia que hay entre los medidores de tipo de álabes concéntricos y de paleta radial está en la forma de las paletas y álabes y, en la colocación física relativa de las paletas o los álabes.

El medidor de álabes concéntricos tiene dos álabes *semicirculares* de hierro dulce. Un álabe está esencialmente dentro del otro, por lo cual, a este aparato se le llama medidor de álabes *concéntricos*. El álabe exterior es más delgado en uno de sus extremos y está fijo; el interior tiene aristas rectas y está sobre un pivote. Cuando fluye corriente a través de la bobina, las líneas de fuerza cortan ambos álabes, pero la distorsión de las



El álabe estacionario del medidor de álabes concéntricos se hace más delgado para dar un campo magnético uniforme entre los dos álabes

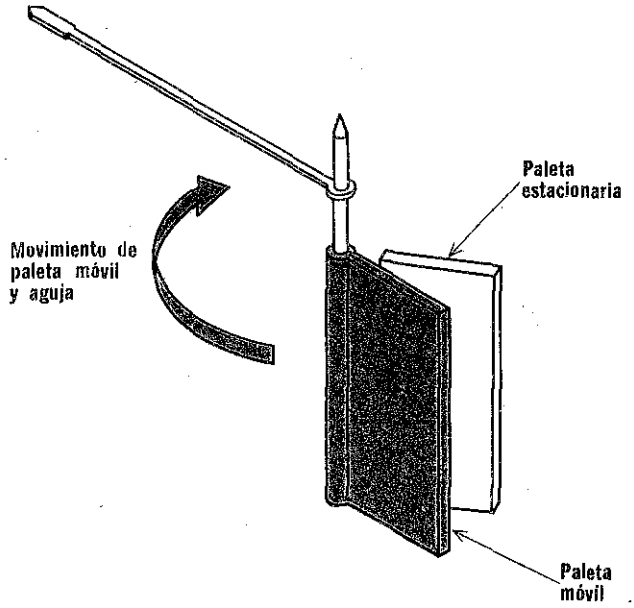
ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
"ACERVO"

líneas de fuerza no es igual en ambos álabes. Las líneas de fuerza están uniformemente distribuidas a través del álabe móvil (interno) porque tiene dimensiones uniformes; pero no están uniformemente distribuidas en la estacionaria (externa), debido a que tiene una arista inclinada. En consecuencia, menos líneas de fuerza pasan a través del extremo delgado que en el resto del álabe, debido a que el extremo delgado es más pequeño que el resto del álabe y, por lo tanto, tiene mayor reluctancia.

Cuando ambos álabes se magnetizan con la *misma* polaridad, se repelen, haciendo que el álabe móvil gire sobre su pivote. La repulsión más fuerte ocurrirá en el área donde el álabe estacionario *no sea* delgado, ya que allí habrá más líneas magnéticas. Esto significa que el álabe móvil se moverá hacia el extremo delgado del álabe estacionario, ya que tiene menos líneas de fuerza.

paletas y álabes de hierro (cont.)

El medidor de paleta radial tiene dos paletas rectangulares de hierro: una fija y otra que puede girar. El medidor de paleta radial funciona según el mismo principio que el medidor de paleta concéntrica, excepto porque, debido a que las paletas tienen la misma forma y tamaño, hay un campo magnético uniforme entre las paletas móvil y la fija. Como puede verse, ambos tipos de medidor son idénticos, excepto en cuanto a la forma y la orientación de sus paletas. Ambos tipos de mecanismos están protegidos por cubiertas de hierro para evitar que campos magnéticos externos afecten la lectura en el medidor.



Tanto la paleta estacionaria como la móvil en el medidor de paleta radial tienen las mismas dimensiones para dar un campo magnético uniforme entre ellas.

Igual que en el caso del mecanismo del medidor de bobina móvil, los mecanismos de hierro móvil, tanto de álabes concéntricos como de paleta radial, tienen resortes, pivotes, chumaceras, etc., que sirven para controlar el movimiento de la aguja. Según se podrá ver, estas partes tienen las mismas funciones en ambos tipos de mecanismo.

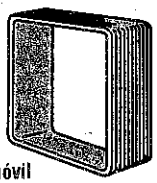
bobinas

Tanto en el mecanismo de los medidores de bobina móvil como en el de hierro móvil, la corriente que se va a medir fluye a través de la bobina. Excepto por esta semejanza, las bobinas en cada tipo de mecanismo son diferentes.

En la página 5-10 se vio que cuando la corriente fluye a través de la bobina del mecanismo de los medidores de bobina móvil, se produce un campo magnético que hace girar a la bobina. Para que la bobina gire fácilmente, debe ser lo más ligera posible y, para que la bobina sea ligera, se devana sobre un marco de aluminio. Además, la bobina está construida con alambre muy delgado y, en comparación con la bobina de otros tipos de medidor, tiene muy pocas espiras, de manera que se conserva lo más ligera posible.

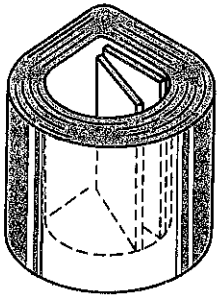
Al estudiar el mecanismo de los medidores de hierro móvil se vio que la bobina de este tipo de mecanismo permanece estacionaria y el campo magnético que rodea la bobina mueve una paleta de hierro. Debido a que esta paleta de hierro es relativamente pesada, para moverla se requiere un intenso campo magnético. Por lo tanto, la bobina de un medidor de hierro móvil tiene muchas espiras de alambre para producir este intenso campo magnético.

Las paletas de hierro del mecanismo de los medidores de hierro móvil se colocan dentro de la bobina. Sin embargo, la forma de la bobina que se usa en el mecanismo de los medidores de álabes concéntricos es diferente de la empleada en los mecanismos de paleta radial. La bobina del medidor de álabes concéntricos se construye de manera que se le puedan adaptar álabes semicirculares y la bobina del medidor de paleta radial se construye de manera que se le puedan instalar placas rectangulares.



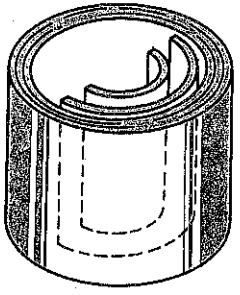
Bobina móvil

La bobina del medidor de bobina móvil consta de varias espiras de alambre delgado devanadas en un cuadro de aluminio

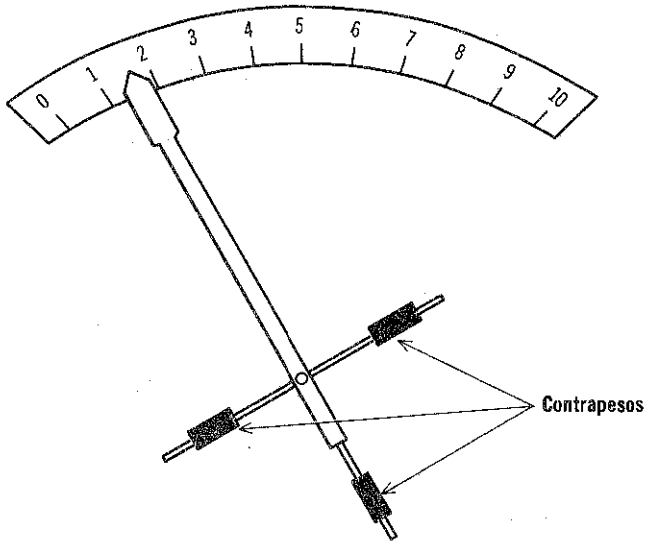


Paleta radial

Las bobinas de los medidores tanto de paleta radial como de álabes concéntricos, de hierro móvil, tienen muchas espiras de alambre. La forma de la bobina difiere para acomodarse a la forma particular de la paleta o el álabe; es decir, radial o concéntrica



Alabe concéntrico



Los contrapesos permiten al fabricante balancear el mecanismo rotatorio del medidor sobre los pivotes

agujas

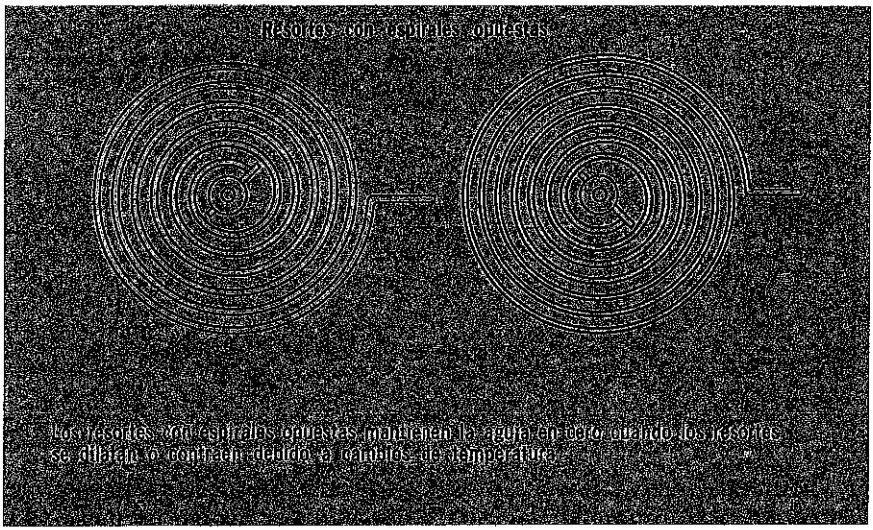
La bobina del mecanismo de los medidores de bobina móvil gira una distancia que depende de la cantidad de corriente que fluye en la bobina. Igualmente, la paleta de hierro de un medidor de hierro móvil se desvía una distancia que depende de la corriente que pasa por la bobina. Por lo tanto, si se monta una aguja a la bobina móvil o a la paleta de hierro, la aguja de cualquier tipo de medidor desviará una distancia que depende de la cantidad de corriente que fluye por la bobina. Si la aguja se mueve frente a una escala calibrada en unidades de corriente, indicará la cantidad de corriente que fluye a través del medidor.

Como la aguja gira con la bobina móvil y con la paleta de hierro, debe ser lo más ligera posible. Por lo tanto, generalmente se hace de aluminio muy delgado.

Las agujas que se utilizan en la mayor parte de los medidores tienen pequeños contrapesos montados en un extremo. Según se ha estudiado, la aguja y todas las otras partes rotatorias de un medidor están montadas sobre un eje común que gira sobre pivotes. Durante la fabricación del mecanismo del medidor estos contrapesos se ajustan de manera que el conjunto del eje y todas las partes montadas al eje estén perfectamente *balanceadas* sobre los pivotes.

resortes

Cuando se conecta un medidor a un circuito, la aguja debe indicar la cantidad de corriente que fluye en el circuito. Cuando el instrumento se desconecta al circuito o cuando cesa el flujo de corriente, la aguja debe regresar a cero. Este movimiento se controla por medio de los resortes del mecanismo del medidor. De modo que los resortes controlan el movimiento rotatorio de la bobina móvil en el medidor de bobina móvil, así como el movimiento de la paleta móvil en el medidor de hierro móvil. Por lo tanto, deben de fabricarse resortes con gran precisión para asegurar la exactitud del medidor.

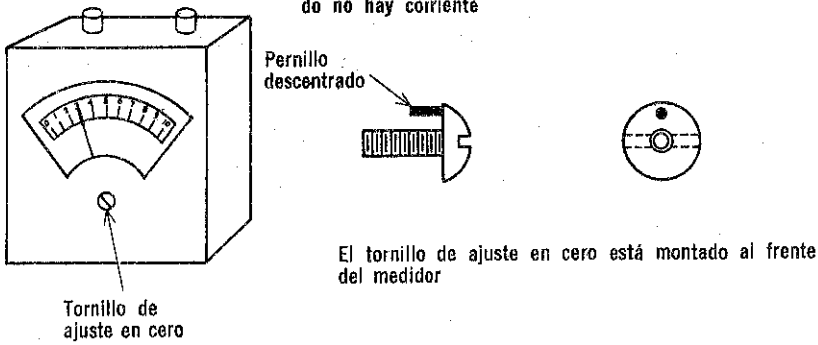


En cada medidor se usan dos resortes, los cuales están enrollados en sentidos opuestos. Hay una razón muy importante para ello: se sabe que el metal se dilata al aumentar la temperatura y se contrae al disminuir ésta. Si ambos resortes estuvieran enrollados en el mismo sentido se dilatarían o contraerían en la misma dirección cuando cambiara la temperatura. Esto haría que la aguja girara alejándose del cero cuando no hubiese corriente y produciría un error en la lectura del aparato al medir una corriente. En cambio, si los resortes están enrollados en sentidos opuestos, al expanderse uno de ellos, debido a un aumento de la temperatura, tenderá a mover la aguja en una dirección, pero como el otro se dilata y trata de mover la bobina en la dirección opuesta, anula la acción del primero y la aguja permanece en cero. Cuando la temperatura disminuye, los resortes enrollados en sentidos opuestos se contraen en el mismo grado, y la aguja también permanece en cero.

ajuste en cero

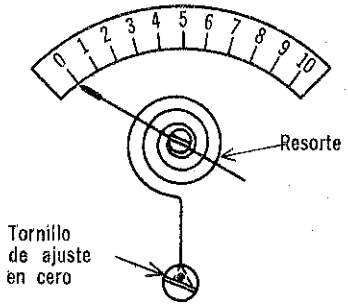
Ya se explicó que los resortes que controlan la rotación de la aguja del medidor se enrollan en sentidos opuestos a fin de mantener la aguja en cero cuando no fluye corriente a través del medidor. Si los dos resortes estuvieran perfectamente balanceados en todos los aspectos, entonces la aguja permanecería exactamente en cero cuando no fluyera corriente. Sin embargo, en la práctica es imposible construir dos resortes perfectamente iguales que al cambiar la temperatura se dilaten o contraigan en el mismo grado. Además, los resortes pierden tensión al pasar el tiempo. En consecuencia, los resortes no siempre mantendrán la aguja exactamente en la lectura cero de la escala cuando no haya corriente. Para corregir esto, la mayor parte de los medidores tienen un *tornillo de ajuste en cero* que permite ajustar la aguja en cero.

El tornillo de ajuste en cero varía la tensión del resorte para ajustar la aguja a la lectura de escala cero cuando no hay corriente



El tornillo de ajuste en cero está sobre la parte de enfrente del medidor. Al girar el tornillo, aumenta a disminuye la tensión de uno de los resortes, según la dirección en que gire. Al girar el tornillo, la tensión del resorte al que está unido se puede ajustar hasta que sea igual a la tensión del otro resorte. Además, cuando las tensiones de ambos resortes son iguales, la aguja permanece en la lectura cero de la escala.

Cuando el tornillo de ajuste en cero se gira a la izquierda, se reduce la tensión del resorte y la aguja se mueve hacia la derecha de la escala



Cuando se gira a la derecha el tornillo de ajuste en cero, la tensión del resorte aumenta y la aguja se mueve sobre la escala, hacia la izquierda

resumen

☐ Todos los mecanismos básicos de medidor tienen una construcción similar, aunque su operación eléctrica es diferente. ☐ Las partes básicas de los medidores son: bobina, aguja, escala, pivotes, chumaceras, resortes, pernos de retención, tornillo de ajuste cero y un mecanismo amortiguador. ☐ El medidor de bobina móvil también tiene un imán permanente, en tanto que el medidor de hierro móvil tiene paletas de hierro dulce. ☐ Los medidores de termopar son idénticos a los de bobina móvil, excepto porque también tiene un termopar y un alambre caliente.

☐ El imán permanente de un medidor de bobina móvil tiene piezas polares de hierro dulce, así como un núcleo de hierro dulce para asegurar que las líneas magnéticas de fuerza se concentren entre los polos magnéticos. ☐ Las paletas de los medidores de hierro móvil están construidas de hierro dulce. Estos mecanismos están protegidos por cubiertas de hierro para evitar que la acción de campos magnéticos externos pueda afectar la lectura del medidor. ☐ En un medidor de bobina móvil ésta consta de unas cuantas espiras de alambre muy delgado, devanado sobre un marco de aluminio para que sea lo más ligera posible. ☐ La bobina de un medidor de hierro móvil tiene muchas espiras de alambre para producir un campo magnético intenso, el cual pueda mover a la paleta o al álabe de hierro relativamente pesada.

☐ Como la aguja de un medidor debe moverse junto con la bobina móvil o con la paleta de hierro, generalmente está hecha de aluminio muy delgado y de muy poco peso. ☐ Generalmente sobre la aguja se montan contrapesos por medio de los cuales se balancea la parte móvil del medidor. ☐ Se usan resortes que están devanados en direcciones opuestas para compensar la dilatación y contracción que ocurre en los resortes como resultado de cambios de temperatura. ☐ La tensión de los dos resortes del medidor se controla por medio del tornillo de ajuste en cero. La presión del tornillo se ajusta para que ambos resortes tengan la misma tensión, de manera que al no haber corriente en el medidor, la aguja indica cero en la escala del medidor.

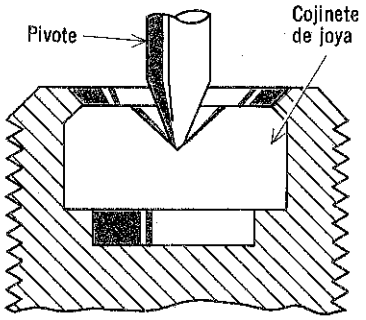
preguntas de repaso

1. ¿Qué partes básicas son comunes a la mayor parte de mecanismos de los medidores?
2. ¿Qué son *piezas polares?* ¿Por qué se usan?
3. ¿Cuáles son las diferencias entre las paletas de los medidores de álabes concéntricos y paleta radial?
4. ¿Debe la bobina de un medidor de bobina móvil producir un campo magnético intenso? ¿Por qué?
5. ¿Por qué debe ser ligera la bobina de un medidor de bobina móvil?
6. ¿Qué son los *contrapesos?* ¿Por qué se usan?
7. ¿Cómo influyen los resortes en la precisión de un medidor?
8. ¿Por qué se usan dos resortes?
9. Si ambos resortes perdieran la mayor parte de su tensión, ¿cómo afectaría esto al funcionamiento del medidor?
10. ¿Cuál es la función del *tornillo de ajuste en cero*?

pivotes, cojinetes y pernos de retención

Las partes rotatorias de cualquier medidor deben girar lo más libremente que sea posible con objeto de que se puedan medir corrientes muy pequeñas. Para reducir al mínimo la fricción, el eje sobre el cual están montadas las partes giratorias tiene pivotes de acero endurecido en ambos extremos, de manera que pueda girar fácilmente.

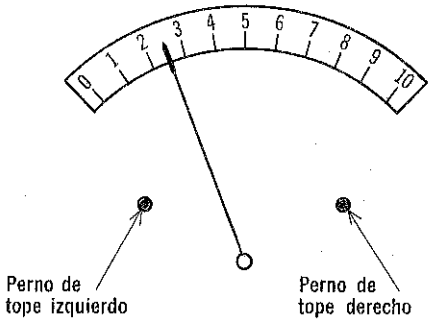
Los pivotes están montados en cojinetes de rubíes para reducir aún más la fricción.



Los pivotes de acero endurecido, montados en cojinetes de joya, reducen la fricción que se encuentra en las partes rotatorias de un medidor

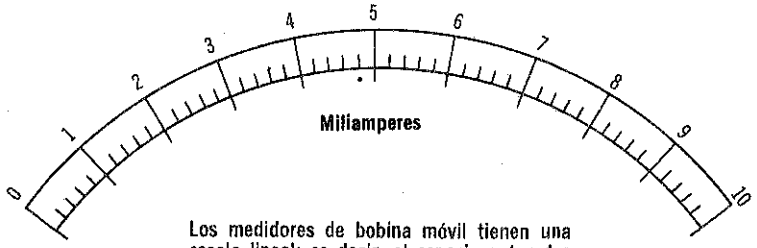
Los pernos de retención evitan que la aguja del medidor se salga hacia la izquierda o la derecha de la escala. Por lo tanto, estos pernos de retención limitan la cantidad de movimiento de la aguja y de todas las demás partes rotatorias del medidor.

Los pernos de tope limitan la distancia sobre la cual pueden girar la aguja y otras partes del medidor



escalas para medidores de bobina móvil

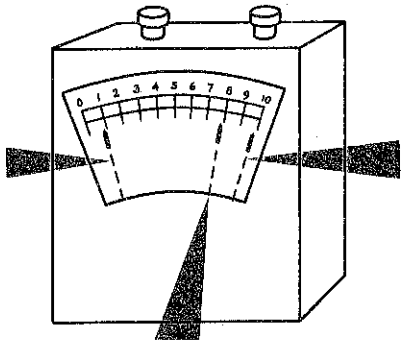
Los medidores de bobina móvil tienen una escala *lineal,* es decir, una escala en la cual el espacio entre los números es igual. La distancia que la aguja se desvía sobre la escala es *directamente proporcional* a la cantidad de corriente que fluye a través de la bobina del medidor.



Los medidores de bobina móvil tienen una escala lineal; es decir, el espacio entre dos divisiones consecutivas es invariable

Cuando toda la corriente nominal de un medidor de bobina móvil fluye en la bobina, la aguja recorre toda la escala; cuando la mitad de la corriente nominal del medidor fluye en la bobina, la aguja se moverá la mitad de la distancia en la escala, etc. La razón es que el flujo magnético producido por la bobina aumenta en proporción directa a la corriente; de manera que la interacción de los campos también aumenta proporcionalmente, para dar una lectura lineal. Esto no ocurre con los instrumentos de tipo de hierro móvil, como se explicará más adelante.

Los medidores de bobina móvil tienen escala lineal



Cuando pasa un miliampere, la aguja se moverá un décimo de la escala plena

Cuando fluyen 10 miliamperes, la aguja oscilará toda la escala

Cuando fluyen 8 miliamperes, la aguja oscilará ocho décimos de la escala plena

La oscilación de la aguja es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que pasa por la bobina

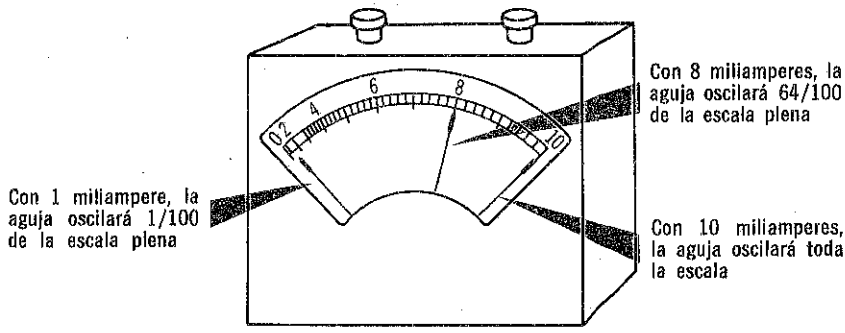
Los medidores de hierro móvil tienen una escala no lineal; esto hace que los números en el extremo inferior de la escala estén aglomerados y sean difíciles de leer

escalas para medidores de hierro móvil

Según se ha estudiado, la escala de un medidor de bobina móvil es lineal. Si la cantidad de corriente en el medidor se duplica, la distancia en que la aguja se desvía también se duplica, si la corriente en el medidor se triplica, la distancia de desviación de la aguja igualmente se triplica. Esta relación no rige en medidores de hierro móvil. En lugar de ello, la desviación aumenta según el *cuadrado* de la corriente. Si la corriente que pasa a través del medidor se duplica, la intensidad del campo magnético en cada paleta se duplica y, por lo tanto, la repulsión de cada paleta se duplica también. Como la repulsión de cada paleta ahora es lo doble, la repulsión combinada de las dos paletas se *cuadruplica.* Si se le *triplica,* la repulsión de cada paleta se triplica y la repulsión combinada de las dos se *multiplica* por 9. Por lo tanto, la desviación varía según el *cuadrado* de la corriente no en forma lineal.

Como la desviación no es lineal, la escala de un medidor de hierro móvil debe ser no lineal. Los números en el extremo donde están los valores bajos de la escala están aglomerados y se separan cada vez más hacia el extremo donde están los valores altos de la escala, en donde la desviación es mayor.

Los medidores de hierro móvil tienen escala no lineal



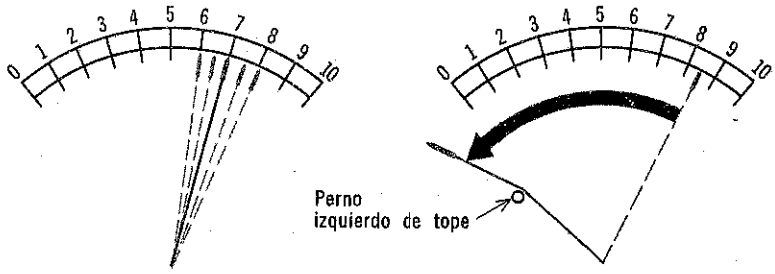
La oscilación de la aguja es directamente proporcional al cuadrado de la corriente que fluye en la bobina del medidor

amortiguamiento

Ya se explicó que todas las partes rotatorias de los medidores se hacen lo más ligeras que sea posible y que giran sobre pivotes montados en cojinetes, con objeto de que la fricción se mantenga al mínimo. El mantener la fricción al mínimo hace posible medir pequeñas corrientes, pero da origen a un problema difícil cuando se desea hacer una lectura en el medidor.

Cuando un medidor está conectado a un circuito, la aguja debe moverse frente a la escala y pararse inmediatamente en la lectura correcta. Sin embargo, debido a la menor fricción de las partes rotatorias, la aguja no se detiene inmediatamente en el punto correcto; lo rebasa por inercia y luego los resortes tiran de ella, rebasando nuevamente, etc. Como resultado, la aguja tiende a oscilar o vibrar repetidas veces con respecto al punto correcto de lectura, antes de quedar en reposo.

A MENOS QUE EL MEDIDOR ESTE AMORTIGUADO



La aguja vibrará varias veces en torno a la lectura correcta antes de que se detenga en ella

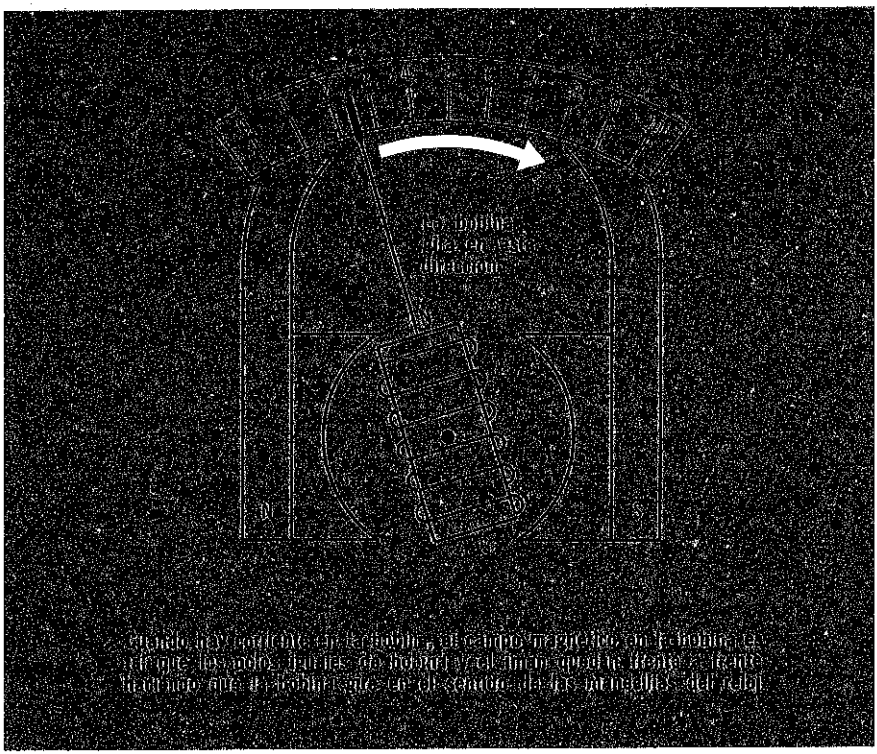
La aguja puede regresar con tal rapidez a cero, que se puede doblar sobre el perno de tope

Para resolver este problema, el medidor debe ser *amortiguado.* El amortiguamiento se puede considerar como una acción de *frenado* sobre las partes rotatorias. Elimina casi completamente la vibración de la aguja, dando como resultado que la aguja dé una indicación rápida y correcta.

El amortiguamiento elimina también otro problema: Cuando un medidor se desconecta de un circuito externo o cuando el circuito no lleva energía, la aguja regresa a cero. Debido a la fricción tan pequeña de las parte rotatorias, el resorte jala violentamente las partes para llevarlas a cero, de hecho, tan violentamente que la aguja podía doblarse al rebasar y golpear el perno de retención izquierdo. Esto ocurre especialmente cuando el instrumento regresa a cero desde una desviación de casi toda la escala. Sin embargo, se explicará cómo el amortiguamiento resuelve este problema, aplicando una acción de frenado a la aguja hasta que regresa a cero.

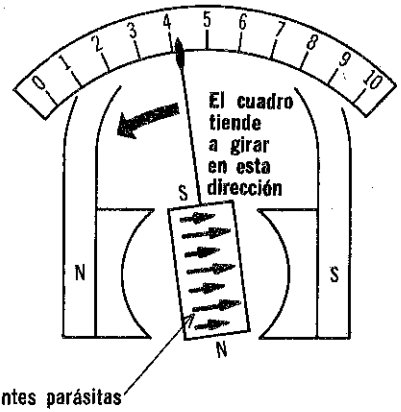
amortiguamiento en un medidor de bobina móvil

Los medidores de bobina móvil utilizan el marco de aluminio sobre el cual está devanada la bobina para amortiguamiento. Como el aluminio es un conductor el marco se comporta como bobina de una espira. Cuando el conjunto de bobina y aguja giran para registrar corriente, el marco de aluminio corta las líneas de flujo del campo del imán permanente. En consecuencia, se inducen en el marco pequeñas corrientes, llamadas corrientes circulantes o de remolino, las cuales originan un campo magnético alrededor del marco mismo.



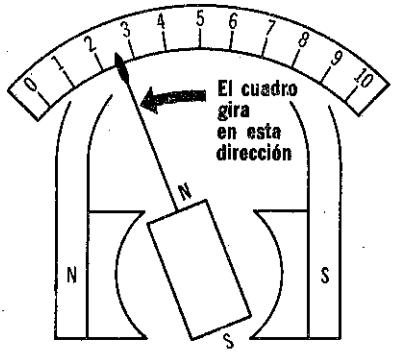
Lo polaridad de este campo magnético es opuesta a la del campo magnético de la bobina. Por lo tanto, el campo magnético que rodea al marco *se opone* al campo magnético en la bobina. Esta acción reduce el valor total del campo de la bobina móvil, de manera que ésta gira más lentamente. En efecto, cuanto más rápidamente se mueva la bobina, más la frena el marco. Esto hace que la bobina y la aguja giren sin vibrar, y más lenta y suavemente hacia la lectura correcta. En cuanto el conjunto de bobina y aguja está en reposo, cesa la inducción de corrientes circulantes en el marco y su efecto magnético desaparece.

Las corrientes parásitas que se producen en el cuadro de aluminio, que actúa como una bobina de una espira, originan un campo magnético que se opone al de la bobina. Por lo tanto, los polos iguales del marco y del imán se atraen, haciendo más lenta la rotación del conjunto de la bobina



amortiguamiento en un medidor de bobina móvil (cont.)

Cuando el medidor se desconecta del circuito o cuando el circuito se desenergiza, ocurre esencialmente lo mismo. El conjunto de bobina y aguja comienza a girar notablemente hacia cero; pero ahora como gira en la dirección opuesta, las corrientes circulantes que se produzcan en el marco fluyen en la dirección opuesta, lo cual tiene como resultado un campo magnético cuya polaridad es opuesta a la anterior. Conforme los resortes jalan al conjunto de bobina y de aguja cada vez más tiende a cero, los polos semejantes del imán permanente y del marco se repelen entre sí cada vez más de manera que el conjunto de bobina nuevamente es frenado y regresa más lentamente a cero. Así pues, se evita que la aguja golpee al perno de retención izquierdo y, quizás, que se doble sobre él.



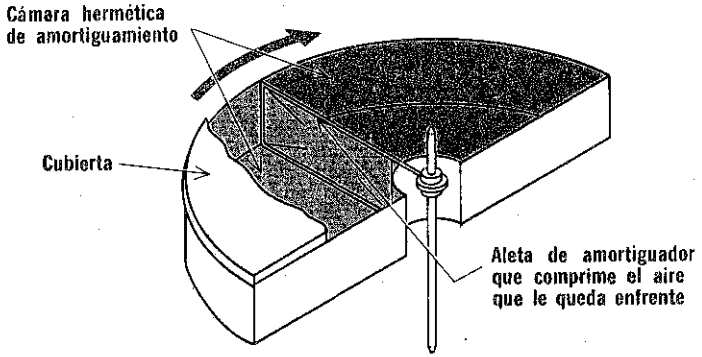
Al llevar los resortes al conjunto de la bobina nuevamente a cero, se origina de nuevo un campo magnético alrededor del marco, pero en dirección opuesta. Al aproximarse a cero el conjunto de la bobina, los polos semejantes del imán y del cuadro se oponen, frenando así a la bobina, de tal manera que se detendrá lentamente en cero

amortiguamiento en un medidor de hierro móvil

Ya se ha explicado cómo se efectúa el amortiguamiento en medidores de bobina móvil. Se producían corrientes circulantes en el marco de aluminio de la bobina al girar ésta dentro del campo del imán permanente y estas corrientes circulantes producían un campo magnético que amortiguaba el movimiento de la aguja. Sin embargo, este tipo de amortiguamiento no se puede usar en un medidor de hierro móvil debido a que la bobina es estacionaria. En lugar de esto se usa *amortiguamiento por aire.*

Existen dos métodos diferentes para obtener amortiguamiento por aire. El método más usado consiste en montar una ligera paleta de aluminio —una *paleta amortiguadora*— sobre el mismo eje que la aguja y la paleta móvil encerrándolos en una *cámara amortiguadora* hermética. Al ser repelida la paleta móvil, la paleta amortiguadora gira con ella. Como la paleta amortiguadora está dentro de una cámara hermética, comprime el aire que le queda al frente en la dirección de su movimiento. Esto hace disminuir la velocidad con que se mueve la paleta y, por lo tanto, disminuye la velocidad de la paleta móvil y de la aguja. Debido a que la velocidad es más lenta, hay menor tendencia de que la aguja rebase el punto de lectura. Cuando la aguja se detiene, el aire frente a la paleta amortiguadora ya no está comprimido y la acción amortiguadora cesa.

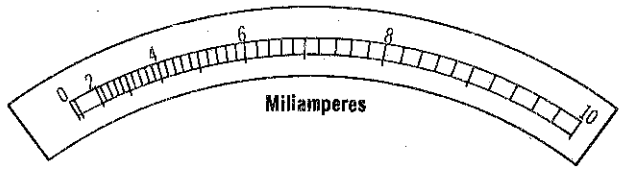
Generalmente, los medidores de paleta radial y los de álabes concéntricos se amortiguan de esta manera. Sin embargo, los medidores de paleta radial pequeños a veces se amortiguan encerrando la bobina y las paletas en una cápsula metálica hermética en lugar de usar una paleta amortiguadora y cámaras separadas. Al ser repelida, la paleta móvil comprime el aire que está frente a ella, haciendo más lento el movimiento de paleta y de aguja. El mismo principio se aplica en ambos métodos; sin embargo, el uso de otra paleta y una cámara generalmente produce el amortiguamiento más efectivo.



El movimiento del eje, que hace girar a la aguja y a la paleta móvil, es retardado por el aire comprimido que está frente a la paleta amortiguadora. Esto hace más lento el movimiento de la aguja de manera que sobrepase menos la lectura.

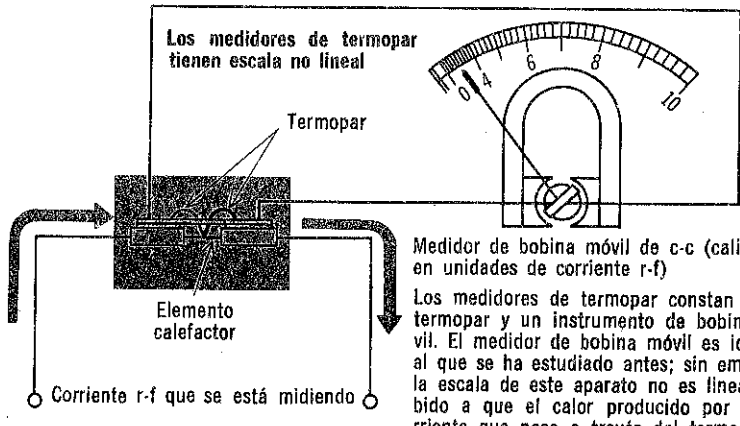
escalas para medidores de termopar

Se ha visto que un medidor de termopar consta de un dispositivo llamado *termopar* y de un *medidor de bobina móvil*. Cuando fluye corriente a través del elemento calentador del termopar, se produce una tensión en los dos extremos libres del termopar. Esta tensión hace que fluya una corriente continua a través del medidor de bobina móvil y la aguja oscila una cantidad proporcional a la cantidad de la corriente que fluye a través del elemento calentador del termopar.



La oscilación de la aguja es directamente proporcional al cuadrado de la corriente que fluye en la bobina del instrumento

La cantidad de oscilación es proporcional a la cantidad de calor producida en el alambre calentador. A su vez, la cantidad de calor producido en el elemento calentador es proporcional al cuadrado de la corriente que fluye en el alambre calentador ($P = I^2R$). Por lo tanto, igual que los medidores de paleta móvil, los medidores de termopar tienen una *escala de ley cuadrática* y las lecturas más bajas en la escala están muy juntas entre sí.

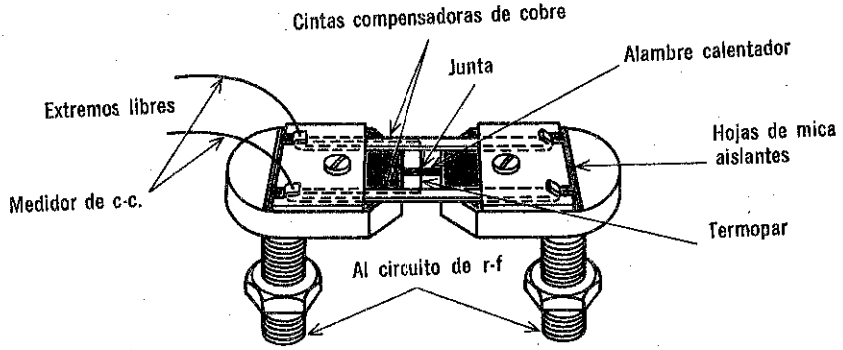


Medidor de bobina móvil de c-c (calibrado en unidades de corriente r-f)

Los medidores de termopar constan de un termopar y un instrumento de bobina móvil. El medidor de bobina móvil es idéntico al que se ha estudiado antes; sin embargo, la escala de este aparato no es lineal, debido a que el calor producido por la corriente que pasa a través del termopar es proporcional al cuadrado de la corriente que fluye a través del elemento calefactor.

estructura de termopares

La tensión generada en los extremos libres del termopar depende de la *diferencia de temperatura* que hay entre los extremos libres (frío) y los extremos de la unión (caliente). Las lecturas del medidor serán incorrectas si la diferencia de temperatura resulta afectada por la temperatura ambiente del área donde se usará el medidor o por calor que transmiten las corrientes que fluyen a través del medidor. Para modificar estos efectos indeseables, cada uno de los extremos libres del termopar está conectado al centro de una tira de cobre. Los extremos de la cinta de cobre están colocados muy cerca del *alambre calentador* de manera que los extremos libres del termopar tienen la misma temperatura que las tiras de cobre. Los extremos de las tiras de cobre están aislados de los extremos del elemento calentador por láminas de mica muy delgada. Como las tiras de cobre alcanzan la misma temperatura que los *extremos del alambre calentador*, los extremos libres del termopar alcanzan la misma temperatura que los extremos libres del alambre calentador. Por lo tanto, la temperatura de los extremos libres del termopar depende de la corriente que fluye a través del alambre calentador y no de otros factores; como sería la temperatura ambiente.



Independientemente de los efectos de la temperatura externa, la diferencia de temperatura que hay entre los extremos libres y los extremos de unión de este termopar compensado permanecerán constantemente para una corriente de r-f dada

Cuando fluye corriente a través del alambre calentador la temperatura aumenta mucho más en el centro —es decir, en el punto en que el alambre y la unión del termopar se juntan— que en los extremos del alambre calentador. Para determinada corriente, esta *diferencia de temperatura* entre la unión del termopar y los extremos libres del termopar permanecerá constante, independientemente de los efectos de temperatura exterior.

resumen

☐ Las partes rotatorias de un medidor están conectadas a un eje que tiene pivotes de acero templado en ambos extremos. Los pivotes se montan en cojinetes de rubíes para mantener la fricción al mínimo. ☐ Para evitar que la aguja se salga de la escala, se usan pernos de retención en ambos extremos de la escala de un medidor. ☐ Los medidores de bobina móvil tienen escalas lineales. Esto se debe a que la distancia que oscila la aguja frente a la escala es directamente proporcional a la cantidad de corriente que fluye a través de la bobina del medidor. ☐ Los medidores de hierro móvil tienen escalas que siguen una ley cuadrática. Esto se debe a que la oscilación de la aguja varía según el cuadrado de la corriente que pasa por la bobina. ☐ Los números en el extremo inferior de la escala de ley cuadrática están muy próximos entre sí y se separan cada vez más hacia el extremo que indica alta corriente. ☐ Los medidores de termopar, igual que los medidores de hierro móvil, tienen escalas cuadráticas.

☐ El amortiguamiento produce una acción de frenaje sobre la aguja del medidor para evitar que vibre en torno a una lectura, antes de quedar en reposo. También evita que la aguja regrese demasiado rápido a cero cuando el medidor es desconectado de un circuito. ☐ En medidores de bobina móvil, el amortiguamiento lo proporciona el marco de aluminio del aparato. ☐ Las líneas de flujo de la bobina móvil cortan al marco de aluminio y originan corrientes circulantes en el marco. Estas producen un campo magnético propio que se opone al campo de la bobina, frenando el movimiento.

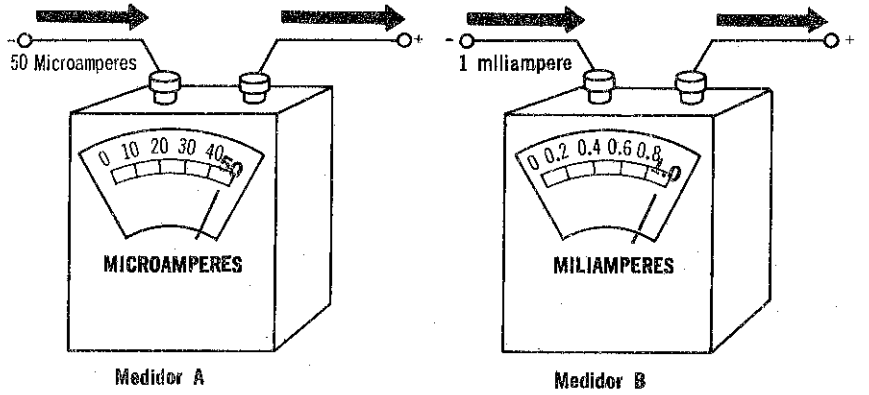
☐ En medidores de hierro móvil, el amortiguamiento generalmente lo produce una paleta amortiguadora que se mueve en una cámara hermética. ☐ La paleta de amortiguamiento se mueve junto con la paleta móvil y la aguja. Al moverse, comprime el aire que tiene al frente y al hacer esto, se frena. ☐ La tensión generada por un termopar depende de la diferencia de temperatura que haya entre los extremos libres y la unión caliente. Un medidor de termopar está diseñado de manera que esta temperatura es afectada solamente por la corriente que se mide y no por efectos térmicos externos.

preguntas de repaso

1. ¿Qué es una *escala lineal*? ¿Qué es una *escala cuadrática*?
2. ¿Por qué se usan escalas lineales en medidores de bobina móvil?
3. ¿Por qué se usan escalas cuadráticas en medidores de hierro móvil?
4. Si la corriente que fluye en un medidor de bobina móvil se duplica, ¿cuánto aumenta la oscilación de la aguja?
5. ¿Qué significa amortiguamiento en un medidor?
6. ¿Por qué es necesario el *amortiguamiento*?
7. ¿Cómo se obtiene el amortiguamiento en un medidor de bobina móvil?
8. ¿Cómo se produce el amortiguamiento en un medidor de hierro móvil?
9. ¿Qué efecto tendría demasiado amortiguamiento sobre un medidor?
10. ¿Cómo se compensan los efectos de la temperatura ambiente, en un medidor de termopar?

resistencia interna y sensibilidad

Todas las bobinas de medidor presentan cierta cantidad de resistencia a la c-c. La cantidad de resistencia depende del número de espiras de la bobina y el calibre del alambre que se use para devanarla. En el volumen 1, se explicó que la intensidad del campo magnético que rodea una bobina aumenta según el número de espiras de la bobina. Por lo tanto, si se le dan más vueltas al devanado de la bobina de un medidor, una pequeña corriente puede originar un campo magnético suficientemente intenso para que la bobina oscile en toda la escala.



Medidor A

La sensibilidad del medidor A es de 50 microamperes debido a que la corriente hace que la aguja oscile toda la escala

Medidor B

La sensibilidad del medidor B es 1 miliampere debido a que la corriente hace que la aguja oscile toda la escala

El medidor A tiene una sensibilidad más alta que el B debido a que requiere menos corriente para la deflexión de toda su escala

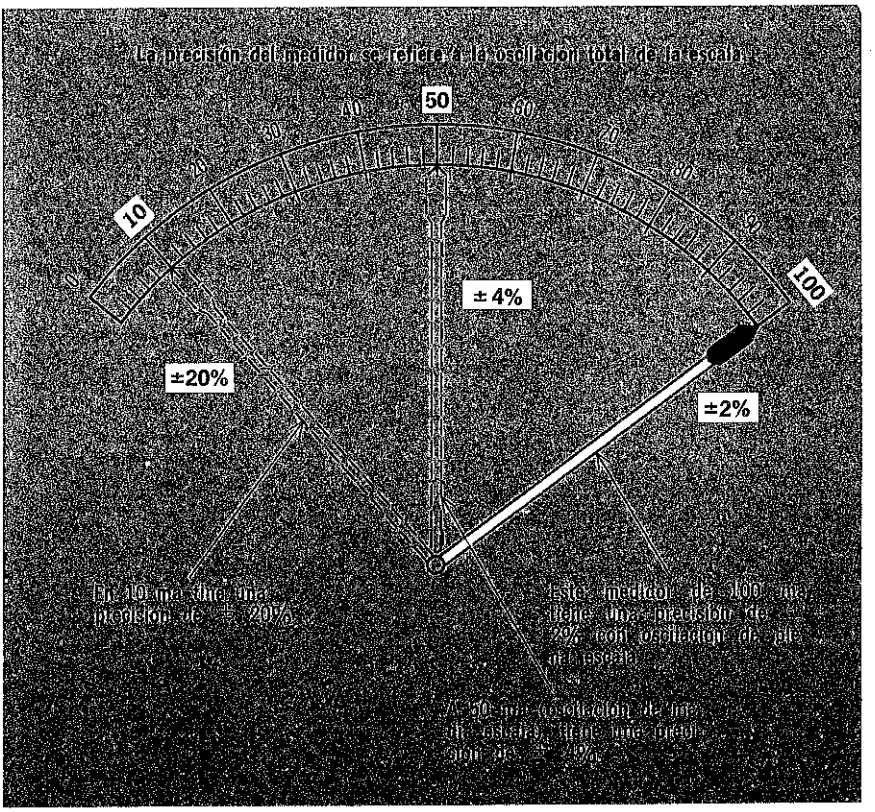
La cantidad de corriente necesaria para que la aguja del medidor oscile en toda la escala es la *sensibilidad del medidor* y constituye una característica importante de cualquier medidor. Las sensibilidades típicas de los medidores de corriente varían desde unos 5 microamperes ... (0.000005 amperes) hasta unos 10 miliamperes (0.010 amperes). Algunos valores comunes son 5, 50 y 100 microamperes, y 1 y 10 miliamperes.

Probablemente ya se ha notado que la sensibilidad del medidor es la corriente *máxima* que puede medir el aparato. Cualquier corriente mayor que ésta, probablemente dañaría al medidor. Demasiada corriente podría hacer que la aguja girara fuera del límite de oscilación de la escala y se doblara sobre el perno de retención que está a la derecha. También podría ocurrir que la bobina se quemara. A veces, una sobrecarga de corriente muy intensa causa ambos tipos de daño.

precisión del medidor

La precisión de un medidor se especifica como *porcentaje de error a la oscilación de escala plena.* Por ejemplo, si la precisión específica de un medidor de 100 miliamperes se establece como ± 2 por ciento, entonces el medidor no sólo puede tener una exactitud de ± 2 miliamperes en una lectura de 100 miliamperes, sino que podría ser inexacta hasta en ±2 miliamperes para cualquier lectura de un valor menor que el de la oscilación total de la escala. Por lo tanto, la precisión de un medidor disminuye progresivamente mientras más lejos esté la aguja de la oscilación total de la escala y más cerca del cero.

Por ejemplo, en una lectura de 50 miliamperes el medidor que puede tener ± 2 miliamperes, en realidad sólo es preciso hasta en ± 4 por ciento. En una lectura de 10 miliamperes, el medidor podría tener aún un error de ± 2 miliamperes, lo que daría una precisión real de lectura de ± 20 por ciento. Naturalmente, esto se basa en una lectura de escala plena de 100 miliamperes. Sin embargo, si se usan ciertos rangos del medidor con circuitos adecuados, puede mejorarse la precisión señalada, según se explicará posteriormente.



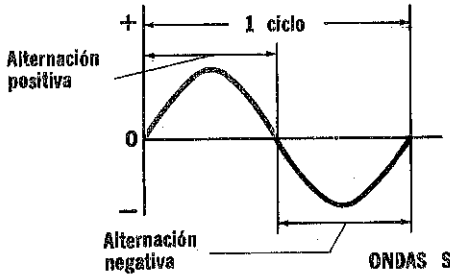
¿qué medidores sirven para c-c y para c-a?

Todos los medidores básicos descritos hasta ahora se pueden usar para medir c-c. Entre ellos, sin embargo, el medidor de bobina móvil es el que se utiliza más frecuentemente por ser el más sensible y preciso. Los medidores de álabes concéntricos y de paleta radial, aunque pueden medir tanto c-a como c-c, generalmente se usan para medir c-a de baja frecuencia. En realidad, aún en aplicaciones de c-a, el medidor de bobina móvil se usa mucho más que los otros tipos de medidores; pero, para medir c-a, ésta debe convertirse primero a c-c y luego aplicarse al medidor. Este tipo de aparato se llama *medidor de rectificador* y se estudiará posteriormente.

Los medidores de termopar se pueden usar para medir tanto c-a como c-c. Sin embargo, en la práctica se usa casi exclusivamente para medir corrientes de radiofrecuencia. Las frecuencias de estas corrientes varían desde unos cuantos megaciclos hasta miles de megaciclos y sólo pueden medirse con un medidor de termopar, debido a que funciona a base del calor producido por la corriente y es insensible a la frecuencia. Otros medidores son imprecisos para mediciones de alta frecuencia.

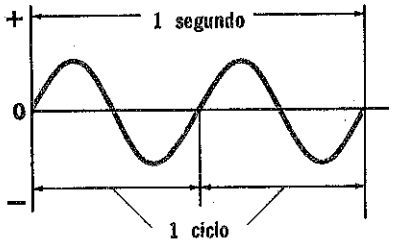
APLICACIONES DE MEDIDORES EN c-c Y EN c-a

Movimiento básico del instrumento	Mide c-c	Mide c-a	Observaciones
Bobina móvil	sí	no	Casi todas las mediciones de c-c se efectúan con este tipo de medidor.
Bobina móvil de tipo rectificador	no	sí	Básicamente consiste en un medidor de bobina móvil y un rectificador para cambiar c-a a c-c. Es el medidor más comúnmente usado para medir c-a.
Paleta de hierro	sí	sí	
Termopar	sí	sí	Usado casi exclusivamente para medir corrientes de radiofrecuencia por ser el único medidor con capacidad para medir estas altas frecuencias.



Una corriente de c-a completa un ciclo cuando va de cero al máximo positivo, luego a cero, y al máximo negativo, y regresando nuevamente a cero. El ciclo completo consta de una alternación positiva y una negativa

ONDAS SINUSOIDALES



La frecuencia de esta onda de c-a es de 2 ciclos por segundo debido a que, dos veces por segundo, la onda va de cero al máximo positivo, luego a cero y al máximo negativo, regresando nuevamente a cero

repaso de c-a

Antes de estudiar las características del medidor de rectificador de c-a, conviene que se comprendan perfectamente las características de las ondas de c-a que se describieron en el volumen 3. Por lo tanto, ahora se hará un breve repaso.

La corriente alterna fluye periódicamente, primero en una dirección y luego en la dirección opuesta. A una dirección se le llama *positiva* y a la otra *negativa.* Se le llama *frecuencia* de la corriente alterna al *número de veces por segundo* que pasa la corriente de cero al máximo positivo, regresa a cero, pasa al máximo negativo y regresa nuevamente a cero. Por ejemplo, si la corriente alterna pasa 5 veces en un segundo de cero al máximo positivo, de cero a máximo negativo y luego a cero, se dice que la frecuencia de la corriente es de 5 *ciclos por segundo* (cps). La parte del ciclo durante el cual la corriente fluye en una dirección recibe el nombre de *alternación*; así pues, una onda de c-a tiene alternaciones positivas y negativas.

Se recordará de los estudiado en el volumen 3 que una onda de c-a puede tener muchas formas; por ejemplo, puede ser sinusoidal, cuadrada, diente de sierra, etc. Como se explicará en seguida, los medidores de c-a están calibrados a base de *ondas sinusoidales.* Cuando se usa un medidor de c-a para medir ondas sinusoidales, sólo se obtiene una indicación aproximada de los valores. Algunas veces, el indicador puede ser tan impreciso que la lectura carece de significado. Por lo tanto, deben usarse otros instrumentos de medición —por ejemplo, los osciloscopios— en lugar de los medidores de c-a para medir ondas de forma no sinusoidal.

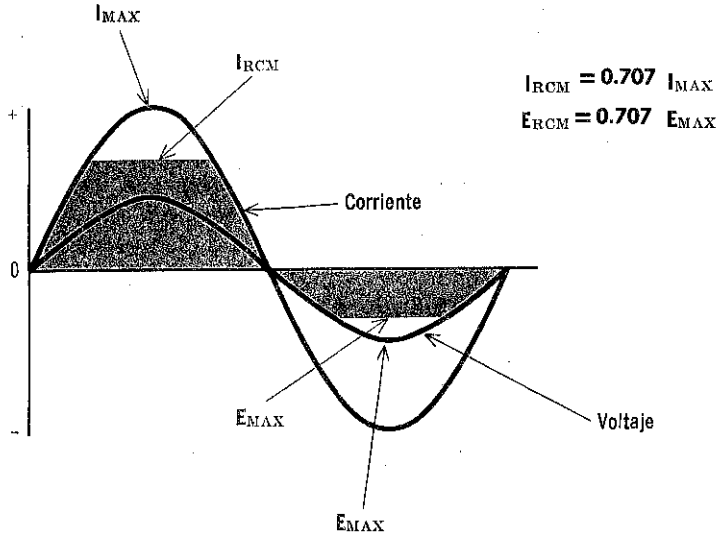
valores rcm y medio de una onda sinusoidal

El valor de la raíz cuadrática media (rcm) de una onda sinusoidal se describió en el volumen 3; pero en atención a su importancia en el estudio de medidores ahora se hará un breve repaso.

Las unidades eléctricas básicas; esto es, el ampere y el volt, se basan en c-c. Por lo tanto, se tuvo que deducir un método para relacionar c-a con c-c. El valor máximo o *pico* de una onda sinusoidal, no se puede usar debido a que la onda sinusoidal sólo permanece en su valor máximo durante un corto lapso, en una alternación. Así pues, una onda sinusoidal cuya corriente máxima sea de un ampere no es igual a una corriente continua de un ampere desde un punto de vista de energía, ya que la corriente continua siempre permanece en un ampere.

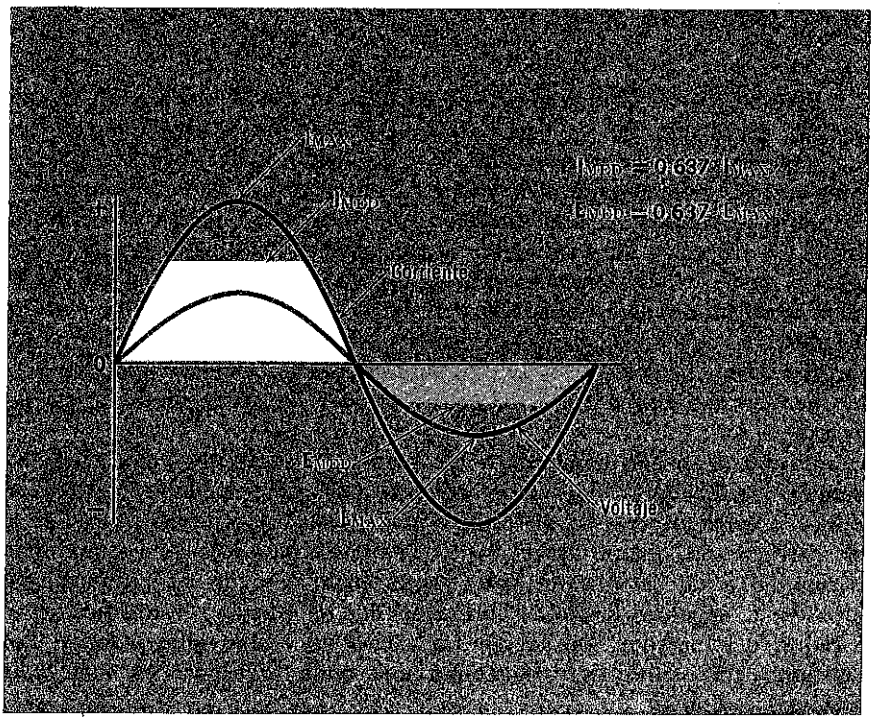
Se ha deducido una relación basada en los efectos de calentamiento de c-a y c-c. Se observó que una corriente igual a 0.707 del máximo de una onda de c-a producía el mismo calor o perdía la misma potencia que una corriente continua igual para una resistencia dada. Por ejemplo, una onda sinusoidal con un valor máximo de 3 amperes tiene un efecto térmico de 0.707 × 3 o sea 2.121 amperes de c-c.

El valor 0.707 se puede derivar de la siguiente manera: El efecto de calentamiento que produce la corriente se basa en la fórmula básica de potencia que se estudió en el volumen 2; es decir $P = I^2R$, donde P es la potencia disipada como calor. A partir de esta fórmula, se puede apreciar que el calor varía de acuerdo con el cuadrado de la corriente.

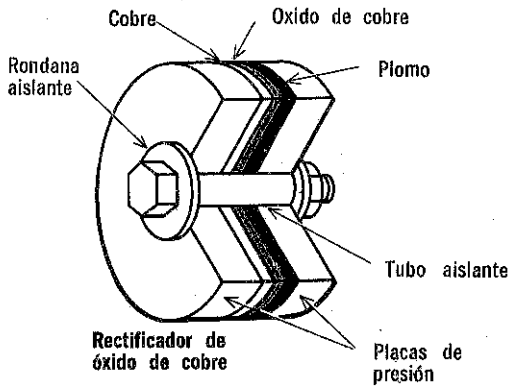


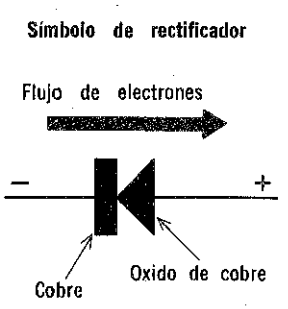
valores rcm y medio de una onda sinusoidal (cont.)

Cuando una onda sinusoidal alcanza su valor máximo, el calor disipado es máximo. Menores valores de calor corresponden a disipaciones de valores de corriente debajo del valor máximo. Para determinar la cantidad de calor disipado durante todo un ciclo de onda sinusoidal, primero debe *elevarse al cuadrado* cada valor *instantáneo* de la *corriente,* y hacer luego la *suma.* Entonces se obtiene el medio (o promedio) de esta suma. Después, se saca la *raíz cuadrada* del medio y la respuesta será el valor de la *raíz cuadrática media* (rcm) de la onda sinusoidal. Con frecuencia, al valor rcm de una onda sinusoidal se le llama *valor eficaz,* debido a que 0.707 del valor máximo de una onda sinusoidal tiene el mismo efecto que una cantidad igual de c-c.



Otra característica de las ondas sinusoidales que es importante en el estudio de los instrumentos es el *valor medio* de la onda sinusoidal. El valor medio se obtiene durante una alternación y es igual a 0.637 del valor máximo de la onda sinusoidal. Tanto el valor de la raíz cuadrática media como el valor medio de la onda sinusoidal se revisarán a continuación.





Por medio de un rectificador para convertir c-a a c-c, pueden usarse los medidores de bobina móvil en aplicaciones de c-a

rectificadores

El medidor de bobina móvil es el más sensible y preciso de los que se han estudiado. Sin embargo, sólo se puede utilizar para medir c-c; no hay manera de que puela usarse para medir directamente c-a. Si se aplicara c-a directamente al medidor, la mitad del ciclo tendería a mover la aguja del mismo en una dirección y la otra mitad tendería a moverla hacia la dirección opuesta. Aun a frecuencias muy bajas la aguja no podría moverse con la rapidez suficiente para seguir las alternaciones positivas y negativas de la onda de c-a. Por lo tanto, en lugar de moverse frente a la escala, la aguja simplemente vibraría en torno a cero. Pero si primero se convierte la c-a a c-c, antes de aplicarla al medidor, entonces el medidor de bobina móvil se podría utilizar en aplicaciones de c-a así como en c-c.

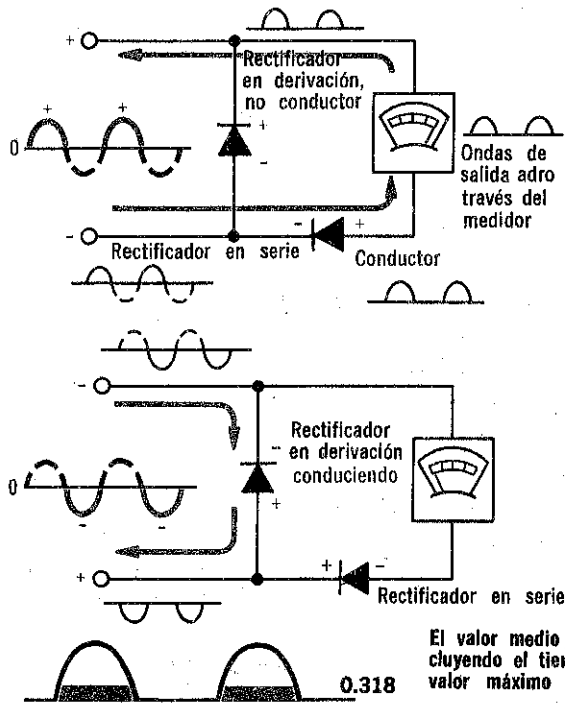
La c-a se puede convertir a c-c mediante dispositivos especiales llamados *rectificadores*, los cuales ofrecen una oposición muy grande al flujo de corriente en una dirección y una oposición muy pequeña al flujo de corriente en la otra dirección. Por lo tanto, cuando se aplica una onda sinusoidal a un rectificador, éste dejará pasar *una* de las alternaciones, positiva o negativa, según la forma en que se conecte el rectificador al circuito del medidor. En ningún caso pasarán ambas alternaciones. Por lo tanto, un rectificador transforma una onda sinusoidal en una *onda continua pulsante*.

Los rectificadores de óxido de cobre son los que más frecuentemente se usan en medidores. Estos se componen de una serie de discos de óxido de cobre separados por discos de cobre y se unen con tornillos. Como la corriente fluye fácilmente del cobre al óxido de cobre, pero no del óxido de cobre al cobre, el rectificador sólo permite el flujo de la corriente en una dirección. Algunos medidores de rectificador tienen rectificadores de selenio, sin embargo el principio según el cual funcionan es el mismo.

medidor con rectificador de media onda

Se ha explicado que un rectificador convierte la c-a a c-c. Existen dos tipos básicos de circuitos rectificadores: el de media onda y el de onda completa. En el rectificador de media onda, una alternación de la corriente pasa a través del medidor y la alternación opuesta es puenteada por el rectificador. Aunque la corriente en el medidor sea pulsante, la aguja del medidor no tendrá suficiente tiempo para seguir estas fluctuaciones debido a su inercia. Por lo tanto, la aguja del medidor se detendrá en una posición que corresponde al valor medio de la corriente que fluye por él. El valor medio de la corriente para una alternación es 0.637 del valor máximo; pero, para la siguiente alternación es cero y esa alternación no pasa por el medidor; por lo tanto, la corriente media para un ciclo completo es igual a la suma de ambas alternaciones dividida entre 2 o sea 0.637/2 = 0.318 del valor máximo. Entonces la aguja del medidor oscila hacia la posición que en la escala representa 0.318 del valor máximo de la corriente que fluye a través del medidor. Pero, para que la lectura tenga algún significado, la escala generalmente se calibra para que indique el valor rcm equivalente. Por lo tanto, los puntos de la escala están calibrados a 0.707 de los valores máximos equivalentes.

Funcionamiento de rectificador de media onda



En las alternaciones positivas de la onda sinusoidal de entrada, no puede pasar la corriente a través del rectificador en derivación; en lugar de ello, las alternaciones positivas fluyen a través del medidor y el rectificador en serie

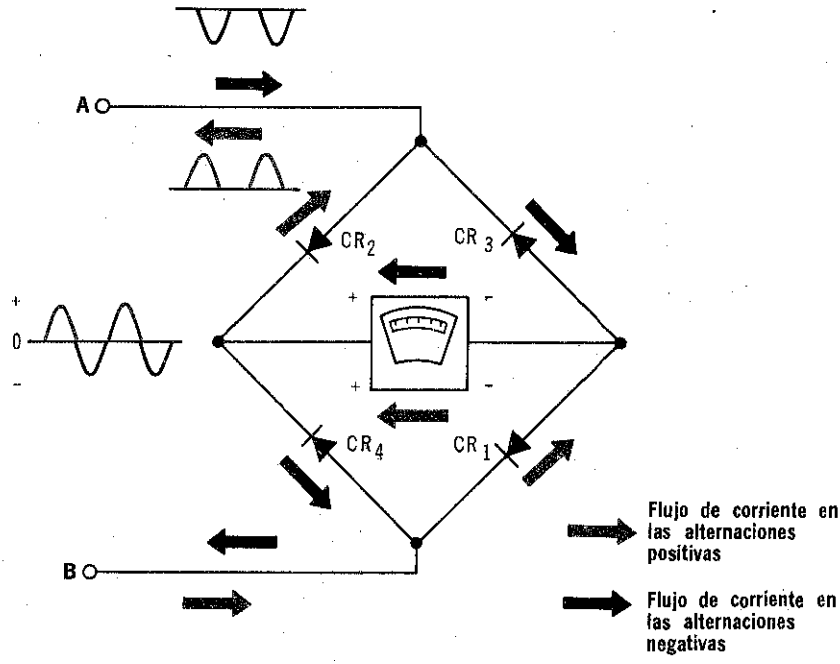
En las alternaciones negativas de la onda sinusoidal de entrada, la corriente es puenteada alrededor del medidor por el rectificador en derivación y es bloqueada del medidor por el rectificador en serie

El valor medio del tren de pulsos entero, incluyendo el tiempo entre pulsos, es 0.318 del valor máximo

medidor con rectificador de onda completa

En el medidor con rectificador de onda completa, la corriente fluye a través del medidor en la *misma dirección* en ambas alternaciones de la onda sinusoidal de c-a. Esto se obtiene mediante cuatro rectificadores en una disposición que se llama *circuito rectificador de fuente.* Cuando la onda sinusoidal de entrada es positiva (alternación positiva) la corriente fluye de la terminal B a través del rectificador CR_1, pasa *a través del medidor*, luego a través del rectificador CR_2 y finalmente llega a la terminal A. En la alternación negativa de la onda sinusoidal de entrada, la corriente fluye de la terminal A a través del rectificador CR_3, pasa *a través del medidor*, luego a través del rectificador RC_4 y finalmente llega a la terminal B. Así, puede apreciarse que en *ambas* alternaciones la corriente fluye a través del medidor en la misma dirección. En esta forma, la onda sinusoidal de entrada de c-a se convierte a c-c pulsante. Es pulsante debido a que aún es variable en amplitud y es c-c debido a que no cambia de dirección en el medidor.

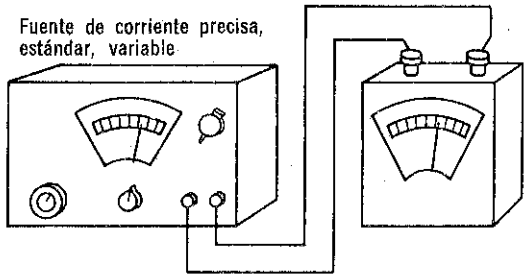
En la disposición del rectificador de onda completa, el flujo medio de corriente a través del medidor es el doble de lo que es en la disposición de media onda. En la disposición de onda completa, la corriente media es 0.637 del valor máximo debido a que *ambas mitades* de la onda sinusoidal fluyen a través del medidor. También en este caso, la escala generalmente se calibra de manera que indique valores rcm; es decir, 0.707 de la corriente de máximo que debe medirse.



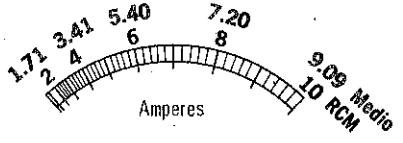
calibración de medidores c-c y c-a

Tanto los medidores de c-c como los de c-a se calibran esencialmente de la misma manera. Para calibrar un instrumento de c-c, se conecta al medidor una fuente de corriente c-c muy precisa. La salida de la fuente de corriente debe ser variable y debe disponerse de algún medio para controlar la corriente de salida de la fuente. Muchas fuentes tienen un medidor interno para este objeto. La corriente de salida de la fuente se hace variar en grados muy pequeños y, a cada grado, se marca la escala del medidor calibrado para que corresponda a la lectura en el dispositivo de control. Este procedimiento se repite hasta que se ha calibrado toda la escala del medidor.

El mismo procedimiento se emplea para calibrar un medidor de c-a, salvo que frecuentemente se usa una onda sinusoidal de 60 cps. Además, se sabe que un instrumento de c-a indica el valor medio de una onda sinusoidal, pero conviene que el medidor indique valores rcm. Por lo tanto, se calculan los equivalentes rcm y es lo que se marca en la escala.



Los medidores de corriente se calibran con una fuente de corriente muy precisa. Para calibrar un medidor de c-a, generalmente se usa una onda sinusoidal de corriente de 60 cps



Aunque los medidores de c-a miden corriente media, sus escalas se calibran en unidades de corriente rcm

Los medidores de termopar están calibrados a base de una onda sinusoidal; pero la calibración se hace a la frecuencia a la cual deberá usarse el medidor. A las frecuencias extremadamente elevadas a las que se usan, ocurre un fenómeno que se conoce como *efecto superficial.* A estas frecuencias, la corriente que fluye en un alambre viaja en la superficie del mismo. Cuanto más alta sea la frecuencia, la corriente fluye más cerca de la superficie del conductor. Este efecto aumenta la resistencia del elemento térmico de termopar debido a que, en efecto, el diámetro del alambre es más pequeño. Por lo tanto, como la resistencia del elemento térmico varía según la frecuencia, los medidores de termopar deben ser calibrados a frecuencias específicas.

precisión de los medidores de c-c y c-a

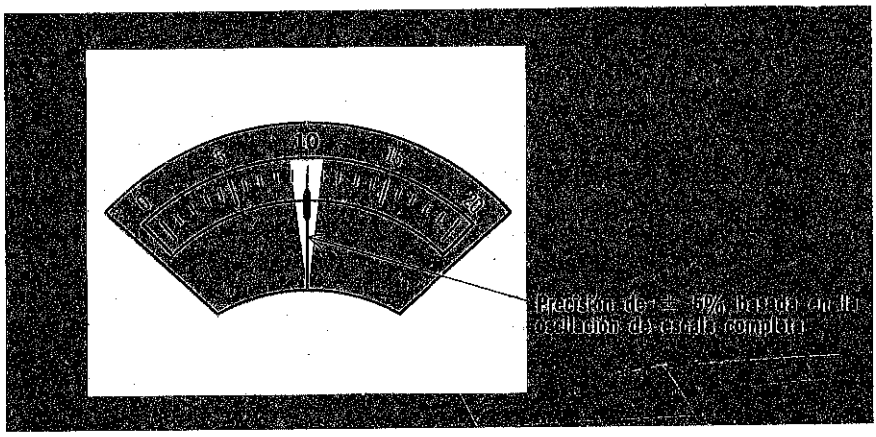
Los medidores de bobina móvil diseñados para uso general tienen una precisión de aproximadamente ±2 por ciento. Sin embargo, los medidores de bobina móvil hechos para usos de laboratorio o para otras aplicaciones especiales a menudo tienen una precisión de ±0.1 a ±0.5 por ciento (± 1/10 a ± 1/2 de 1 por ciento). Téngase presente que la precisión del medidor —según se ha señalado anteriormente— se basa en la oscilación de escala completa.

Los medidores de hierro móvil, tanto de álabes concéntricas como de paleta radial, tienen una precisión de ±5 por ciento. En el medidor de rectificador, aunque básicamente es un medidor de bobina móvil, no tiene la precisión del medidor básico de bobina móvil. Las imprecisiones del rectificador se suman a la imprecisión intrínseca del medidor y la exactitud total de éste suele ser de ±5 por ciento o menos.

El uso del termopar en un medidor de termopar también produce cierto error en la lectura del aparato, el cual se agrega al error ocasionado por el propio medidor básico de bobina móvil. El error que produce el termopar generalmente varía del ±1/2 al ±1 por ciento, de manera que éste debe sumarse al error producido por el particular de bobina móvil empleado en el medidor de termopar.

PRECISIÓN DE MEDIDORES

Medidor	Precisión típica
Bobina móvil	0.1 a 2 %
Hierro móvil	5 %
Bobina móvil tipo rectificador	5 %
Termopar	1 a 3 %



respuesta de frecuencia

La respuesta de frecuencia de un medidor de bobina móvil o de hierro móvil está limitada principalmente por la reactancia inductiva de la bobina. De lo estudiado en el volumen 3 se recordará que la reactancia inductiva (X_L) de una bobina es igual a:

$$X_L = 2\pi fL$$

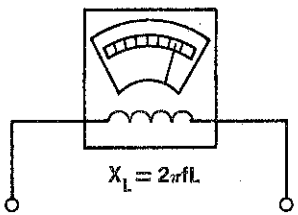
donde f es la frecuencia y L es la inductancia de la bobina. Por lo tanto, al aumentar la frecuencia, también aumenta la reactancia inductiva de la bobina, lo que ocasiona una disminución de corriente en la bobina. Además, los medidores de hierro móvil son afectados por corrientes parásitas y de histéresis en el hierro, de manera que el efecto es mayor a frecuencias más altas.

En la página 5-47, se hizo notar que los medidores de c-a se calibran a 60 cps. Los medidores de hierro móvil se pueden usar hasta unos 100 cps sin un aumento notable en el error de medición. Sin embargo, a frecuencias más altas que ésta las lecturas pierden precisión. Los medidores de bobina móvil tienen una respuesta de frecuencia ligeramente mejor.

La frecuencia del medidor de tipo rectificador está limitada principalmente por la capacitancia existente en el rectificador. Por ejemplo, un rectificador de óxido de cobre tiene una capacitancia de aproximadamente 0.009 microfarads y, al aumentar la frecuencia, la reactancia capacitiva del rectificador disminuye de acuerdo con la siguiente ecuación:

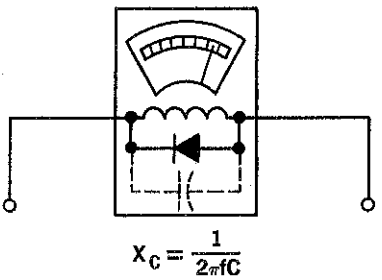
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

y se comporta como una trayectoria de c-a de baja resistencia en el rectificador. Las lecturas en el medidor se hacen de aproximadamente ½ a 1 por ciento más bajas por cada 1,000 cps que aumente la frecuencia. Debido a esto, los medidores de rectificador generalmente no se usan para medir frecuencias superiores a 15,000 cps. Aún a esta frecuencia la lectura del medidor puede ser inexacta hasta en un 15 por ciento, dependiendo de la precisión básica del medidor, cuando éste ha sido calibrado a 60 cps.



En un medidor de hierro móvil, la reactancia inductiva de la bobina limita la respuesta de frecuencia del medidor a unos 100 cps

En el medidor de tipo de rectificador, la capacitancia parásita en el rectificador limita la respuesta de frecuencia del medidor a unos 15 000 cps máximo



resumen

☐ Todo medidor presenta cierta resistencia a la c-c, que depende del calibre del alambre de la bobina y el número de espiras que haya en ella. ☐ La sensibilidad de un medidor es la corriente que hará que la aguja oscile toda la escala. También es la máxima corriente que puede pasar a través de la bobina sin dañar al medidor. ☐ La precisión de un medidor es el porcentaje de error a oscilación de toda la escala. La precisión disminuye progresivamente conforme más lejos esté la aguja de la oscilación total de la escala.

☐ Tanto los medidores de hierro móvil como los de termopar pueden medir c-a y c-c. ☐ El medidor básico de bobina móvil sólo puede medir c-c. Sin embargo, puede medir c-a si ésta se convierte primero a c-c pulsante. A este aparato se le llama medidor de rectificador. ☐ La mayor parte de los medidores de bobina móvil para medir c-a usan rectificadores de óxido de cobre. Algunos usan rectificadores de selenio. ☐ Los medidores de rectificador de media onda sólo miden una alternación de la corriente de c-a. La escala está calibrada para leer el valor rcm (0.707 I_{PC}) aunque la oscilación efectiva es equivalente a 0.637 I_{PC}.

☐ Los medidores se calibran mediante fuentes de corriente precisa y dispositivos de control. ☐ Generalmente, la precisión de los medidores de bobina móvil es de aproximadamente ± 2 por ciento. ☐ La precisión de los medidores de rectificador es de aproximadamente ± 5 por ciento. ☐ La precisión de los medidores de hierro móvil es de aproximadamente ± 5 por ciento y la de medidores de termopar aproximadamente de ± 3 por ciento. ☐ La precisión de todos los medidores disminuye a altas frecuencias.

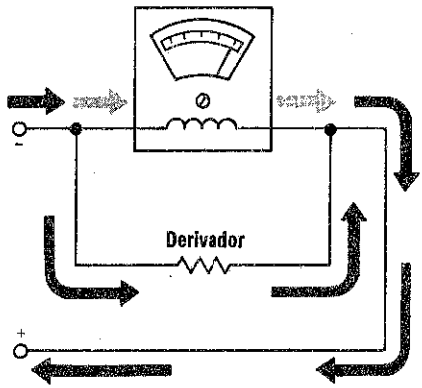
preguntas de repaso

1. Defina *sensibilidades de un medidor,* ¿qué significa este término?
2. ¿Qué significa *valores máximo, medio* y *rcm* de una onda sinusoidal?
3. ¿Por qué no pueden medir c-a los medidores básicos de bobina móvil?
4. ¿Qué es un medidor de rectificador?
5. ¿Qué valor de corriente c-a (máximo, medio, rcm) es al que responde un medidor de rectificador de media onda? ¿Qué valor indica generalmente?
6. ¿En qué tipo de medidor se usa un circuito rectificador de puente?
7. ¿Por qué es conveniente que los instrumentos de c-a indiquen valores rcm?
8. ¿Qué se entiende por *precisión* de un medidor?
9. ¿Por qué un medidor de rectificador es menos preciso que un medidor básico de bobina móvil?
10. ¿Qué tipo de medidor se usa para medir corrientes de alta frecuencia?

derivadores

Los medidores básicos, por sí solos, no pueden resistir corrientes elevadas. De los que se usan actualmente hay pocos que puedan medir más de 10 miliamperes. Sin embargo, en la mayor parte del equipo con que se trabaja, a menudo es necesario medir corrientes de valor mucho más alto que éste. ¿Cómo se pueden medir estas grandes corrientes? La forma más sencilla de medir estas corrientes elevadas —que es la que se emplea en todos los instrumentos actuales— es dejar que sólo una parte de la corriente pase a través del medidor, derivando el resto alrededor de éste. Esto se logra conectando un resistor, llamado derivador, en paralelo con la bobina del medidor. El circuito está diseñado de manera que un *porcentaje específico* de la corriente total del circuito pase a través de la bobina, por lo tanto, la corriente total del circuito se puede calcular fácilmente y, además, se puede marcar en la escala del medidor. Por ejemplo, si el medidor sólo conduce el 10 por ciento de la corriente total del circuito y el resto pasa por el derivador, la corriente marcada en la escala será 10 veces mayor que la corriente que pasa por el medidor.

Si la corriente por medir es mayor que lo que puede manejar el medidor, se puede usar un derivador para puentear la corriente en exceso, de manera que no pase por el medidor

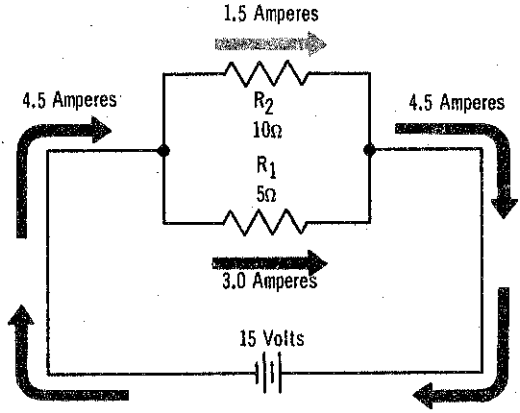


Por lo tanto, el derivador hace posible medir corrientes mucho mayores de las que podrían medirse directamente con sólo el medidor

Toda bobina de medidor tiene una resistencia definida a c-c. Cuando se conecta una derivación en paralelo con la bobina, la corriente se dividirá entre la bobina y el derivador, tal como ocurre entre dos resistores cualesquiera conectados en paralelo. Si se usa un derivador de la resistencia adecuada, la corriente que fluye a través de la bobina del medidor se limitará al valor que pueda manejar con facilidad, y el resto de la corriente fluirá a través del derivador.

Los derivadores se pueden conectar o bien dentro de la caja del medidor o fuera de éste, según la corriente que haya de medirse con el aparato. Los medidores que están diseñados para medir hasta 30 amperes generalmente tienen *derivadores internos*. Los medidores diseñados para medir corrientes superiores a 30 amperes generalmente están dotados de *derivadores externos* para evitar que se dañe el medidor a causa del calentamiento generado en el derivador.

El flujo de corriente se divide entre dos resistores en paralelo, en relación inversamente proporcional a sus resistencias

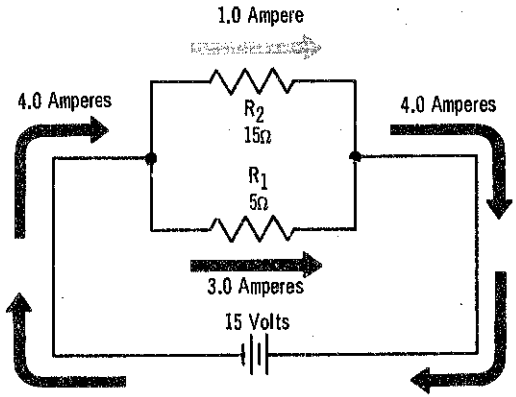


El resistor R_2 tiene el doble del valor que el resistor R_1. Por lo tanto, la corriente en R_2 será de la mitad del valor de la corriente en R_1

flujo de corriente en circuitos en paralelo

Para comprender la forma en que se puede usar un derivador para ampliar el rango de un medidor de corriente, conviene comprender debidamente el comportamiento del flujo de corriente a través de dos resistores conectados en paralelo. En el volumen 2, se explicó que la corriente se divide entre dos resistores en paralelo. También se ha estudiado que la corriente en cada resistor es *inversamente proporcional* a su resistencia; o sea, si un resistor ofrece lo doble de resistencia que otro, la corriente que fluye por el resistor mayor será la mitad de la corriente que fluye por el menor.

El resistor R_2 es tres veces el valor del resistor R_1. Por lo tanto, la corriente en R_2 da un tercio de la corriente en R_1



caídas de voltaje en circuitos en paralelo

Examínese el circuito paralelo que se muestra. Se puede apreciar que la tensión en ambos resistores es igual. Téngase presente que la ley de Ohm establece que la tensión en un resistor es igual a la corriente en el resistor, multiplicada por el valor del resistor. Por lo tanto, la tensión en R_1 es

$$E_{R1} = I_1R_1$$

y la tensión en R_2 es

$$E_{R2} = I_2R_2.$$

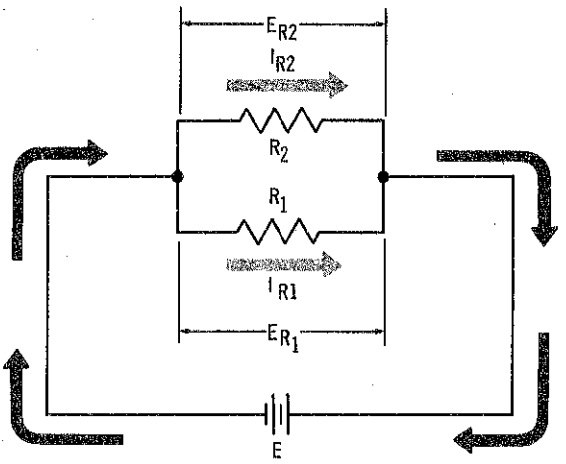
Sin embargo, puesto que el mismo voltaje está aplicado tanto a R_1 como a R_2, luego

$$E_{R1} = E_{R2}$$

Por lo tanto

$$I_{R1}R_1 = I_{R2}R_2$$

Como se observará en seguida, esta ecuación simple, haciéndole modificaciones muy ligeras, se puede utilizar para calcular el valor de un derivador para un medidor de corriente, para cualquier aplicación.



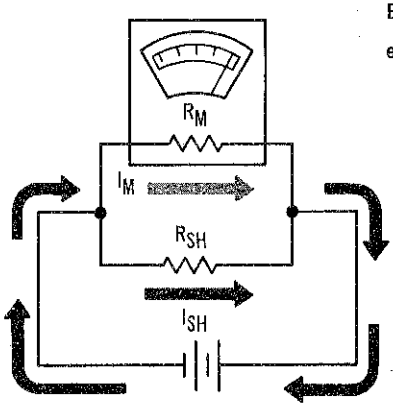
Puesto que aparece el mismo voltaje en R_1 y R_2, entonces $E_{R1} = E_{R2}$. De donde $I_{R1}R_1 = I_{R2}R_2$, lo que puede usarse para calcular el derivador necesario para una medición particular de corriente

ecuación del derivador

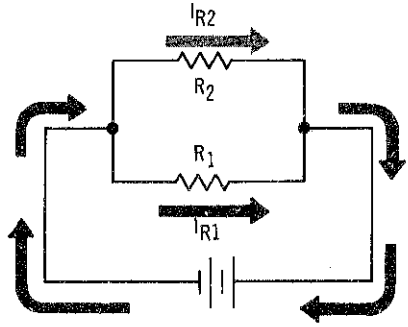
Una combinación de medidor y derivador es igual al circuito en paralelo que se ilustra en la página anterior. En lugar de designar R_2 al resistor superior, se puede identificar como R_M, que representa la resistencia del medidor. El resistor R_1 se puede identificar como R_{SH} para representar la resistencia del derivador. Entonces, I_{R1} e I_{R2} se convierten en I_{SH} e I_M para indicar el flujo de corriente a través del derivador y a través del medidor. Esto significa que la ecuación

$$I_{R1}R_1 = I_{R2}R_2 \qquad \text{se puede escribir como} \qquad I_{SH}R_{SH} = I_MR_M$$

En consecuencia, si se conocen tres de estos valores, se puede calcular el cuarto. Como se estará calculando la resistencia del derivador, necesitan conocerse los otros tres valores. Con mucha frecuencia, la corriente del medidor para la oscilación de toda la escala (sensibilidad del instrumento) y la resistencia del medidor están marcados en la parte delantera del medidor. De no estarlo, se pueden buscar sus valores en el folleto de instrucciones que lo acompaña. El valor de la corriente que fluye a través del derivador (I_{SH}) es simplemente la diferencia existente entre la corriente total que se desea medir y la oscilación efectiva de toda la escala del medidor. Por ejemplo, si se desea extender el rango de un medidor de 1 miliampere a 10 miliamperes, la I_{SH} tendrá que ser de 9 miliamperes, de manera que el medidor mismo no habrá de resistir más de 1 miliampere.



El medidor y el derivador funcionan como R_1 y R_2, en paralelo. Así pues, $R_{SH} = \dfrac{I_MR_M}{I_{SH}}$



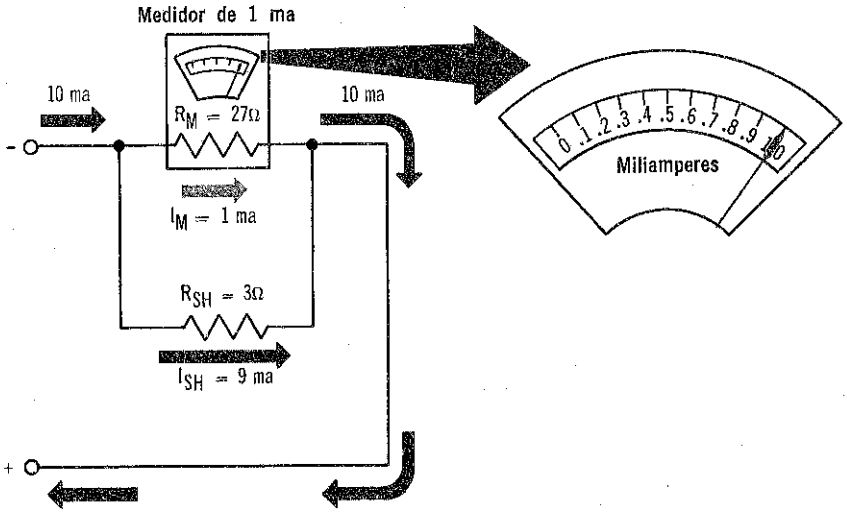
Como siempre debe despejarse la resistencia del derivador, puede expresarse la ecuación de manera que R_{SH} siempre sea la incógnita. Por lo tanto, la ecuación básica $I_{SH}R_{SH} = I_MR_M$ se convierte en:

$$R_{SH} = \frac{I_MR_M}{I_{SH}}$$

A partir de esta ecuación, se pueden calcular los derivadores para ampliar a cualquier valor el rango de un medidor de corriente.

cálculo de la resistencia en derivación

Suponga que se desea ampliar a 10 miliamperes el rango de un medidor de un miliampere y que el medidor tiene una resistencia de 27 ohms. Esto significa que se tendrá una corriente de 10 miliamperes en el circuito cuando la aguja alcance su posición de escala plena.



El rango de este medidor de 1 miliampere se ha ampliado a 10 miliamperes, usando la ecuación de derivación $R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}}$ para calcular el valor de una resistencia en derivación que desviaría 9 miliamperes de corriente por fuera del medidor

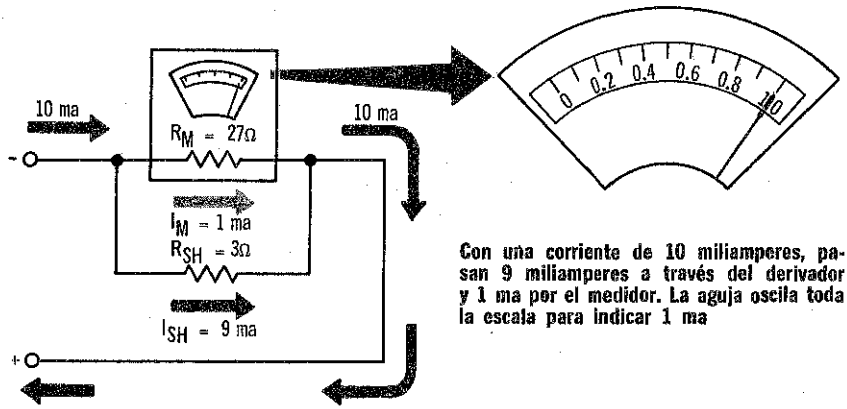
Como el medidor sólo puede conducir un miliampere con oscilación de toda la escala, el *derivador* debe conducir el resto de la corriente, que es de 9 miliamperes.

Ya se conocen la sensibilidad del medidor (I_M), la resistencia del medidor (R_M) y la cantidad de corriente que debe derivarse hacia el derivador (I_{SH}). Mediante la ecuación del derivador, se puede calcular el valor de un derivador que, cuando se miden 10 miliamperes, derivará 9 miliamperes fuera del medidor:

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}}$$

$$= \frac{0.001 \times 27}{0.009}$$

$$= 3 \text{ ohms}$$

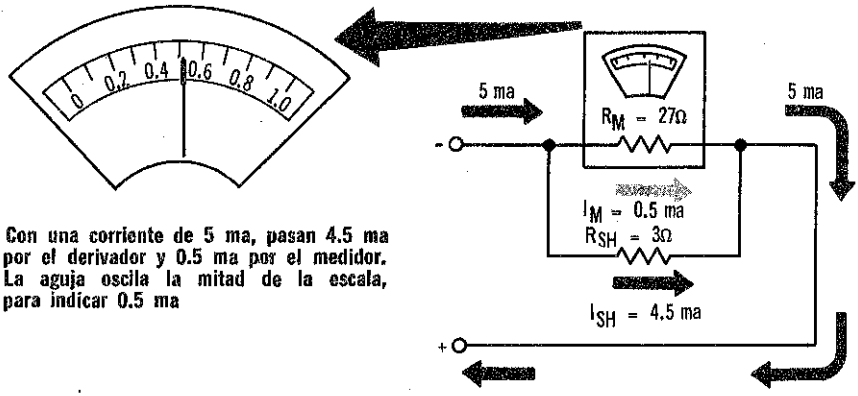


Con una corriente de 10 miliamperes, pasan 9 miliamperes a través del derivador y 1 ma por el medidor. La aguja oscila toda la escala para indicar 1 ma

lectura de un medidor con derivador

Hasta ahora, sólo se ha estudiado la oscilación de toda la escala en un medidor con derivador. ¿Pero qué sucede con la relación existente entre la corriente del medidor y la del derivador cuando no hay suficiente corriente en el circuito para que la aguja se mueva toda la escala?

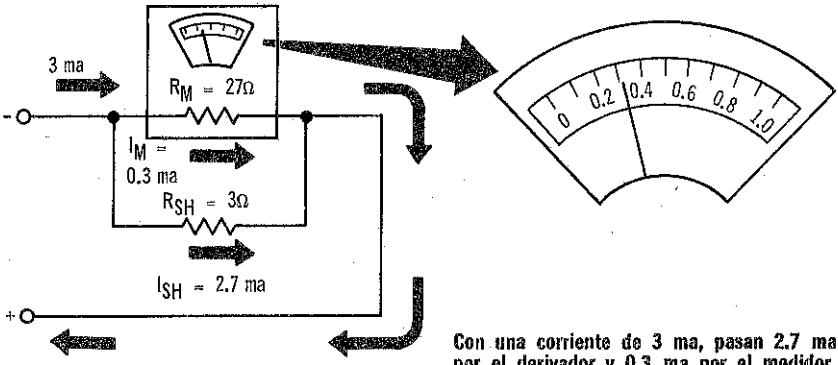
En el ejemplo anterior, la resistencia del derivador es de un noveno de la del instrumento. Por lo tanto, la corriente del derivador será nueve veces mayor que la que pasa a través del medidor. Esta es exactamente la forma en que se comporta la corriente en dos resistores en paralelo: el flujo de corriente en cada resistor es inversamente proporcional a su resistencia.



Con una corriente de 5 ma, pasan 4.5 ma por el derivador y 0.5 ma por el medidor. La aguja oscila la mitad de la escala, para indicar 0.5 ma

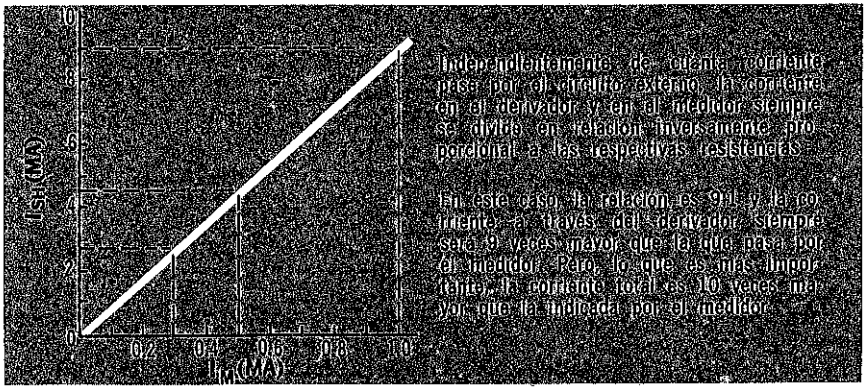
lectura de un medidor con derivador (cont.)

Si el medidor estuviese conectado a un circuito que sólo llevara 5 miliamperes, la corriente se dividiría en relación de 9 a 1 entre el derivador y el medidor. La corriente en el derivador sería de 4.5 miliamperes y la corriente en el instrumento sería de 0.5 miliamperes. Por lo tanto, la aguja oscilaría la mitad de la escala.

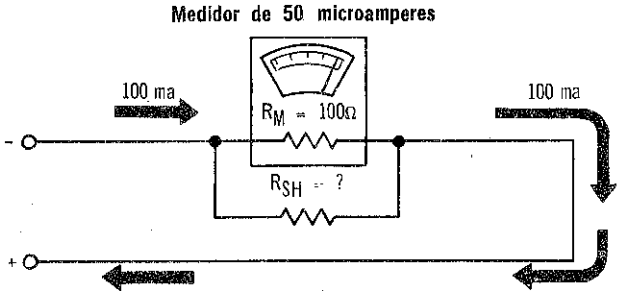


Con una corriente de 3 ma, pasan 2.7 ma por el derivador y 0.3 ma por el medidor. La aguja oscila tres décimas de toda la escala, para indicar 0.3 ma

En forma similar, si el medìdor estuviera conectado a un circuito que llevara 3 miliamperes, la corriente se dividiría nuevamente en relación de 9 a 1; 2.7 miliamperes a través del derivador 0.3 miliamperes a través del medidor. En este caso, la aguja del medidor sólo se movería tres décimas de toda la escala. En realidad, en este caso, la corriente total siempre es 10 veces mayor que la leída en el instrumento.



problemas resueltos



Problema 1. Si se tiene un medidor de 50 microamperes con una resistencia de 100 ohms, ¿qué valor debe tener el derivador para ampliar el rango del medidor a 100 miliamperes?

El primer paso consiste en determinar la cantidad de corriente que debe derivarse a través del derivador (I_{SH}). Se ha dado la sensibilidad del medidor y el rango de corriente deseado; por lo tanto, la corriente en el derivador es

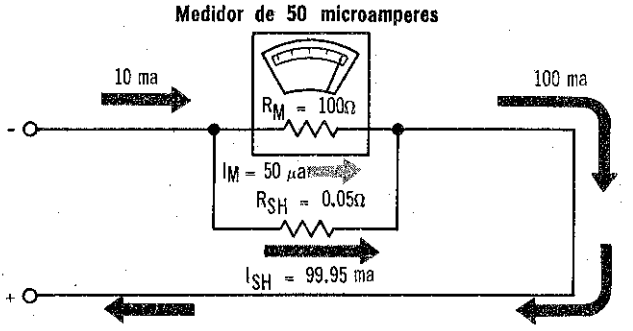
$$I_{SH} = \text{rango deseado de corriente} - \text{sensibilidad del medidor}$$

Debe procurarse que las corrientes se expresen en las mismas unidades. La sensibilidad del medidor, 50 microamperes, es igual a 0.05 miliamperes. Por lo tanto,

$$I_{SH} = 100 \text{ ma} - 0.05 \text{ ma} = 99.95 \text{ ma}$$

Ahora que se ha determinado la corriente del derivador y que se han dado la sensibilidad del medidor y su resistencia, el siguiente paso es aplicar estos valores a la ecuación del derivador para calcular el valor de resistencia del derivador.

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.05 \times 100}{99.95} = 0.05 \text{ ohms (aprox.)}$$



resumen

☐ Los derivadores hacen posible que los medidores sirvan para medir corrientes elevadas. ☐ Un derivador es un resistor conectado en paralelo a la bobina del medidor. El derivador puentea la mayor parte de la corriente medida por fuera de la bobina. ☐ Los circuitos del derivador están diseñados de manera que un porcentaje específico de la corriente total que se mide pase a través de la bobina del medidor. ☐ Los derivadores que están dentro de la caja del medidor reciben el nombre de derivadores internos. ☐ Los derivadores conectados por fuera del medidor se llaman derivadores externos. ☐ Los derivadores externos generalmente se usan para medir corrientes mayores a 30 amperes.

☐ Como en cualquier caso de resistencias en paralelo, las caídas de IR del derivador son iguales a la resistencia de c-c de la bobina del medidor. Así pues: $I_{SH}R_{SH} = I_MR_M$. ☐ Si se conocen la resistencia de la bobina (R_M), la corriente en la bobina requerida para la oscilación de toda la escala (I_M) y la corriente máxima por medir, entonces se puede determinar el valor de resistencia requerido para el derivador (R_{SH}) por la expresión: $R_{SH} = I_MR_M/I_{SH}$ ☐ La resistencia de la bobina y la corriente de la bobina necesaria para la oscilación de toda la escala, con frecuencia están marcadas en la cara del medidor. ☐ La corriente del derivador (I_{SH}) es la diferencia existente entre la corriente total que se mide y la corriente que debe fluir en la bobina para la oscilación de toda la escala.

☐ La relación que hay entre la corriente por medir y la que fluye a través del medidor de corriente es la misma en todo el rango del medidor. En otras palabras, si el derivador conduce el 90 por ciento de la corriente de toda la escala, conducirá el 90 por ciento de cualesquiera otros valores de corriente que se midan.

preguntas de repaso

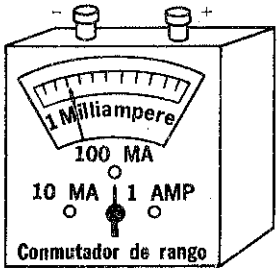
1. ¿Qué es un *derivador*?
2. ¿Por qué se usan los derivadores?
3. ¿Cuál es la diferencia que hay entre *derivadores internos* y *externos*?
4. ¿Tienen los derivadores resistencias pequeñas o grandes? ¿Por qué?
5. Si un medidor ha de desplazarse toda la escala cuando la corriente en la bobina es de 0.5 miliamperes, ¿pasará alguna corriente a través del derivador cuando se mide una corriente de 0.1 miliamperes?
6. Un medidor tiene una sensibilidad de 5 miliamperes y su bobina tiene una resistencia de 200 ohms. ¿Cuál es la resistencia necesaria para ampliar el rango del medidor de 5 amperes?
7. En el medidor de la pregunta 6, ¿cuánta corriente fluye a través del derivador cuando el medidor se usa para medir una corriente de 1 ampere?
8. Si la caída de voltaje en el derivador del medidor es de 0.8 volts, ¿cuál es la caída de voltaje en la bobina del medidor?
9. ¿Afecta un derivador la sensibilidad de un medidor? Explique por qué.
10. ¿Por qué se usan derivadores externos en los medidores diseñados para medir corrientes muy grandes?

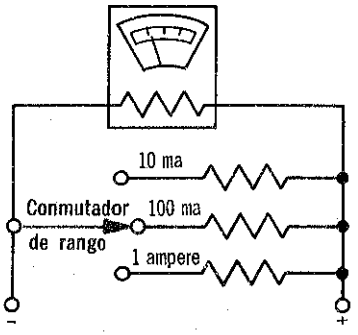
medidores de corriente de alcance múltiple

Sólo en algunas aplicaciones, es práctico usar un medidor de corriente que tenga sólo un rango: por ejemplo, sólo 0-1 miliampere o 0-100 miliamperes, ó 0-15 amperes, etc. Algunos aparatos eléctricos y electrónicos tienen medidores de corriente integrales, de rango único, que miden sólo determinada corriente que exista en el equipo. La corriente de salida de un generador de c-c y la corriente de entrada a un transmisor de radio, a menudo se controlan con sus propios medidores de corriente. Sin embargo, en muchas aplicaciones particularmente cuando se corrigen desperfectos, sería poco práctico tener que usar numerosos medidores de corriente separados para medir todas las corrientes que fluyen en un aparato. En estos casos, se usa el *medidor de corriente de alcance múltiple.*

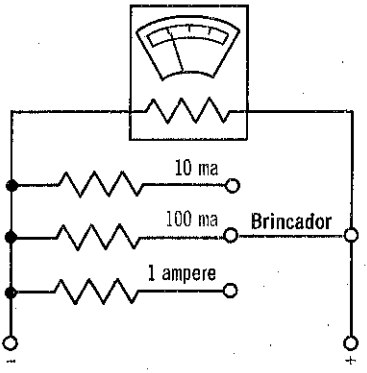
Un medidor de corriente de alcance múltiple tiene un medidor básico y varios derivadores que se pueden conectar en paralelo con el medidor. Generalmente se usa un *interruptor de rango* para seleccionar un derivador determinado para el rango de corriente que se desea. Sin embargo, algunas veces sobre la cubierta misma del medidor se montan terminales separadas para cada rango.

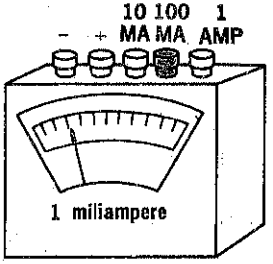
El rango de este medidor de 1 miliampere se ha ampliado para medir 0-10 ma, 0-100 ma y 0-1 ampere, usando derivadores múltiples





Un interruptor de rango suministra la forma más simple de ajustar el medidor al rango deseado





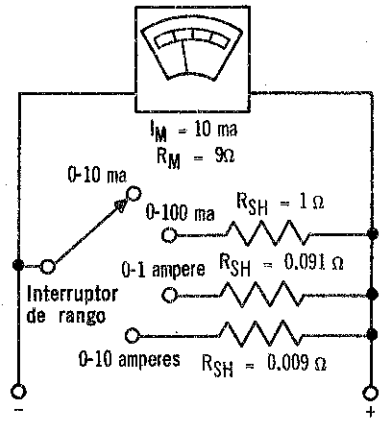
Cuando se usan terminales separadas para seleccionar el rango deseado, debe conectarse un "brincador" de la terminal positiva, para conectar los derivadores al medidor

cálculo de la resistencia de derivadores de alcance múltiple

Algunos medidores de corriente de alcance múltiple tienen hasta 6 o 7 rangos diferentes de corriente, aunque la mayor parte de ellos tienen tres o cuatro. El valor de la resistencia del derivador para *cada* rango se calcula exactamente de la misma manera que el derivador para un medidor de corriente de rango simple.

El rango de este medidor de 0-10 ma, 9 ohms, se ha ampliado para medir 0-100 ma, 0-1 ampere, y 0-10 amperes, utilizando derivadores para cada rango, cuyos valores se determinaron por medio de la ecuación de derivación:

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}}$$



Suponga que se desea ampliar el rango de un medidor de 10 ma, 9 ohms, para que sea posible hacer mediciones de 0-10 ma, 0-100 ma, 0-1 ampere y 0-10 amperes. No se requiere derivador para el rango de 0-10 ma debido a que el mismo medidor puede conducir hasta 10 miliamperes. Para el siguiente rango, 0-100 ma, se usa la ecuación del derivador para calcular una resistencia en derivación que desvíe 90 miliamperes por fuera del medidor.

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.010 \times 9}{0.090} = 1 \text{ ohm} \qquad \text{(para el rango de 0-100 ma)}$$

Ahora se usa la ecuación del derivador para calcular un valor de resistencia en derivación necesaria para el rango de 0-1 amperes. Para este rango, deben desviarse 990 miliamperes por fuera del medidor.

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.010 \times 9}{0.990} = 0.091 \text{ ohms}$$

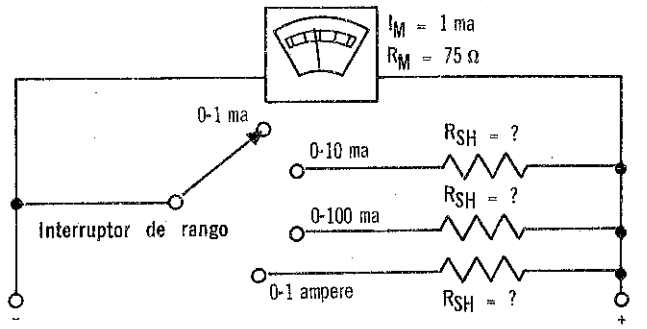
(para el rango de 0-1 ampere)

Finalmente, se calculará el derivador necesario para el rango de 0-10 amperes en la misma forma:

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.010 \times 9}{9.990} = 0.009 \text{ ohm}$$

(para el rango de 0-10 amperes)

problemas resueltos



Problema 2. Con un medidor de 1 ma que tiene una resistencia de 75 ohms, se desea construir un medidor con rango de 0-1 ma, 0-10 ma, 0-100 ma y 0-1 ampere. ¿Qué resistencia en derivación debe agregarse al circuito del medidor?

Cálculo de la resistencia del derivador de 0-1 ma: El medidor mismo puede conducir desde 0 a 1 ma, de manera que no es necesario derivador para este rango.

Cálculo de la resistencia del derivador de 0-10 ma: El primer paso es determinar la corriente que debe puentear el derivador (I_{SH}).

I_{SH} = rango de corriente deseada − sensibilidad del medidor

= 10 ma − 1 ma = 9 ma

Los tres valores conocidos de corriente de medidor (I_M) resistencia de medidor (R_M) y corriente del derivador (I_{SH}) en la ecuación del derivador y resolver la resistencia del derivador (R_{SH}):

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.001 \times 75}{0.009} = 8.333 \text{ ohms}$$

Cálculo de la resistencia de derivador de 0-100 ma: Esto se hace en la misma forma que la del rango de 0-10 ma.

I_{SH} = rango deseado de corriente − sensibilidad del medidor

= 100 ma − 1 ma = 99 ma

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.001 \times 75}{0.099} = 0.758 \text{ ohm}$$

Cálculo de la resistencia del derivador de 0-1 ampere:

I_{SH} = 1 ampere − 1 ma = 1,000 ma − 1 ma = 999 ma

$$R_{SH} = \frac{0.001 \times 75}{0.999} = 0.0751 \text{ ohm}$$

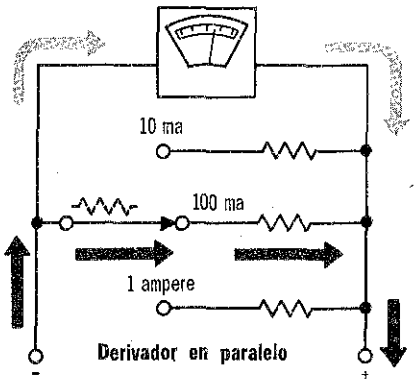
derivadores en anillo

Muchos medidores de corriente de alcance múltiple usan derivadores dispuestos en forma de *derivaciones en anillo*, en donde algunos de los resistores derivadores están en serie con el medidor y otros en paralelo. Los valores de resistencia en serie y resistencia en paralelo dependen del rango utilizado.

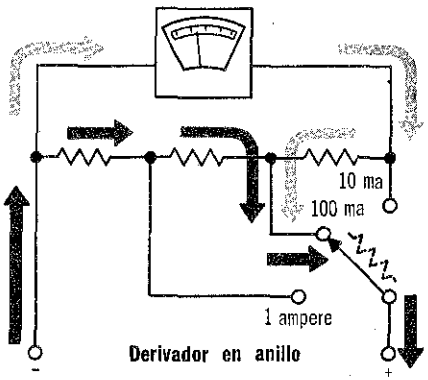
Según se explicará posteriormente, los circuitos de derivación en anillo algunas veces son más complicados que los circuitos de derivación en paralelo. Sin embargo, los derivadores en anillo tienen dos ventajas importantes sobre las derivaciones en paralelo simple:

La resistencia de un derivador se reduce al ampliar el rango de un medidor. Cuando se manejan bajas resistencias derivadas, las resistencias de los contactos del interruptor se vuelven importantes. En los derivadores en paralelo simple que se acaban de estudiar, el interruptor de rango tiene contactos en serie con los derivadores. Por lo tanto, una resistencia en el contacto de 0.0001 ohm en serie con un derivador 0.001 ohms, puede causar un error significativo en la lectura del medidor. Sin embargo, en un circuito derivador de anillo la resistencia de contacto es externa al circuito del derivador; por lo tanto, no tiene efecto alguno en la precisión de la lectura del medidor.

En el circuito con derivador en paralelo simple, el derivador es *retirado* momentáneamente del circuito, cuando el interruptor de rango se mueve a una posición u otra. Durante este lapso, toda la corriente en la línea fluye a través del medidor y este impulso de corriente puede quemar la bobina. Sin embargo, el circuito con derivador de anillo desconecta al medidor del circuito, el cual se prueba cuando se mueve el interruptor de rango de una posición a otra. Se necesitaría un dispositivo interruptor mucho más complicado para hacer lo mismo en un circuito simple de derivadores en paralelo.



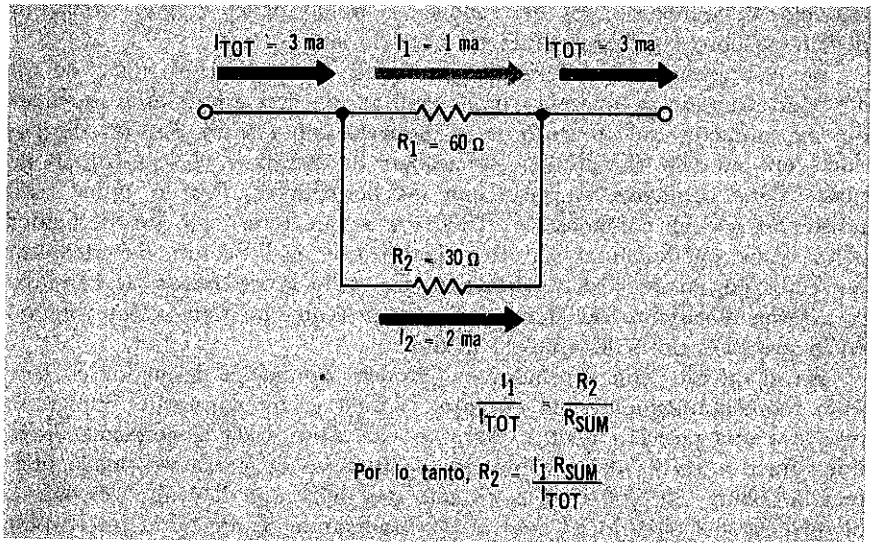
La resistencia de contacto del interruptor de rango se suma a la resistencia del derivador y puede resultar en un error significativo en la lectura del medidor. Pueden circular altas corrientes de impulso a través del medidor, cuando se cambia de escala



La resistencia de contacto del interruptor de rango es externa al circuito del derivador del medidor, lo que elimina el error que se encuentra en la lectura con un derivador en paralelo. Se eliminan las corrientes de impulso altas debido a que el medidor está desconectado del circuito cuando se cambia de rango

ecuación del derivador en anillo

Como en el caso del derivador en paralelo simple, existe una ecuación sencilla que se puede aplicar para calcular los valores del derivador para cada rango de corriente. Pero la simple memorización de la ecuación no tendrá como resultado la comprensión adecuada de la operación del medidor. La debida comprensión exige familiarizarse con la deducción de la ecuación.



Considere dos resistores, R_1 y R_2, en paralelo. R_1 es de 60 ohms y R_2 es de 30 ohms. Ambos se aplicarán para calcular los valores de derivadores de anillo. Si se tiene una corriente total de 3 ma a través de un circuito paralelo, ⅓ de la corriente pasará a través de R_1 y ⅔ a través de R_2. Así pues, se tendrá 1 ma a través de R_1 y 2 ma a través de R_2. La corriente a través de R_2 (2 ma) es lo doble de la corriente que fluye a través de R_1 (1 ma). Nótese que existe la misma relación entre la corriente en una rama y la corriente total (I_{TOT}) que existe entre la *otra* resistencia de la rama y la *suma total* de las *resistencias* de las dos *ramas* ($R_1 + R_2$), a la que se llamará R_{SUMA}. En otras palabras, la relación de I_1 a I_{TOT} es la misma que la relación de R_2 a R_{SUMA}. Matemáticamente,

$$I_1/I_{TOT} = R_2/R_{SUMA}$$

Esta relación se apreciará más claramente, si se substituyen valores en ambos miembros de la ecuación

$$I_1/I_{TOT} = 1 \text{ ma}/3 \text{ ma} = ⅓$$

y

$$R_2/R_{SUMA} = 30 \text{ ohms}/90 \text{ ohms} = ⅓$$

ecuación del derivador en anillo

Substituyendo los valores de resistencia y corriente en ambos miembros de la ecuación, se puede advertir que la relación es 1 a 3 en ambos casos. Por lo tanto,

$$I_1/I_{TOT} = R_2/R_{SUMA}$$

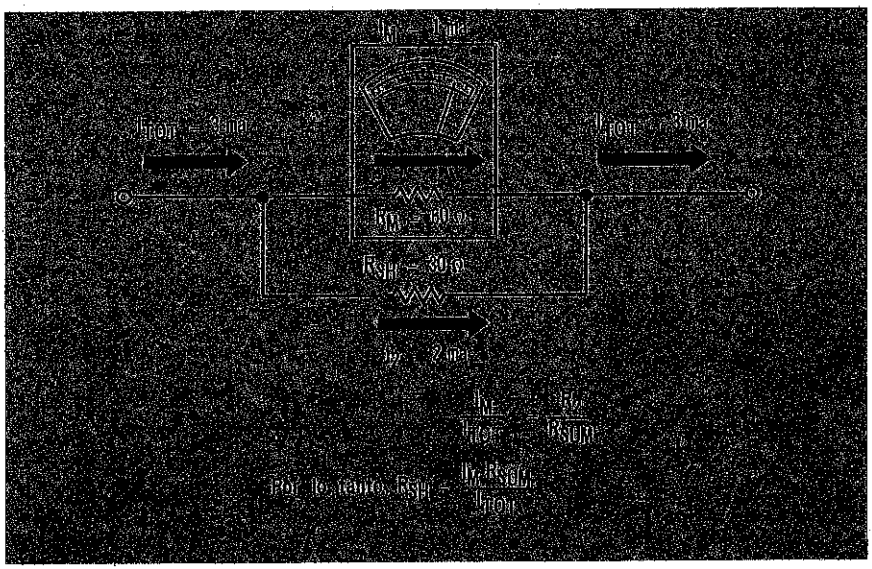
Despejando a R_2:

$$R_2 = \frac{I_1 R_{SUMA}}{I_{TOT}}$$

Puesto que un derivador y un medidor básicamente son dos resistores en paralelo, esta ecuación puede servir para calcular los valores de un derivador en anillo, substituyendo simplemente I_M por I_1 y R_{SH} por R_2:

$$R_{SH} = \frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}}$$

Esta ecuación se puede aplicar para calcular el valor del resistor derivado, en cualquier rango de un circuito de derivadores en anillo.



Debe notarse que R_{SUMA} *no* es la *resistencia efectiva* total de R_1 y R_2 en paralelo. La resistencia efectiva (R_{TOT}) sería menor que R_1 o que R_2 debido a que están en paralelo. R_{SUMA} es simplemente R_1 más R_2 y su único significado es que hace posible establecer una relación matemática para determinar la resistencia del derivador de anillo.

cálculo de la resistencia de un derivador en anillo

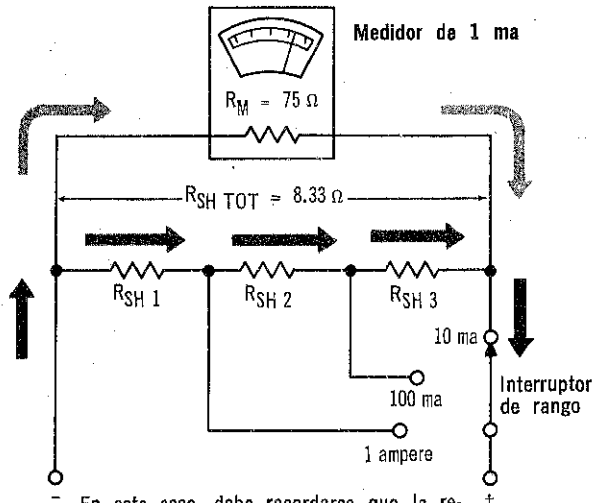
En la página 5-62 se calcularon los valores de los derivadores en paralelo necesario para ampliar el rango de un medidor de 1 ma, 75 ohms a 0-10 ma, 0-100 ma, y 0-1 ampere. Ahora se verá la forma en que se amplía el rango de un medidor a los mismos rangos, usando la disposición del derivador en anillo. La primera etapa para resolver el problema del derivador en anillo es determinar el valor de todo el derivador; esto es, $R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} + R_{SH\ 3}$. En el rango de 0-10 ma, todos estos resistores están en serie y se comportan como un solo derivador para el medidor. Si por un momento se hace caso omiso de los demás rangos se puede apreciar que esto es en realidad una disposición de derivadores en paralelo simple. Por lo tanto, la ecuación del derivador en paralelo puede servir para calcular la resistencia total del derivador, $R_{SH\ TOT}$:

$$R_{SH\ TOT} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}} = \frac{0.001 \times 75}{0.009} = 8.33 \text{ ohms (aprox.)}$$

Ahora se sabe que el valor total de $R_{SH\ 1}$, $R_{SH\ 2}$ y $R_{SH\ 3}$, que también es la resistencia derivada para el rango 0-10 ma. Ahora es necesario determinar los valores particulares de $R_{SH\ 1}$, $R_{SH\ 2}$ y $R_{SH\ 3}$ para ampliar los rangos del medidor de 0-100 ma y 0-1 ampere. Es en este punto donde el procedimiento de derivadores en anillo difiere del procedimiento aplicado a los derivadores en paralelo.

El primer paso es encontrar la resistencia del derivador para el rango más bajo del medidor usando la ecuación de derivación:

$$R_{SH} = \frac{I_M R_M}{I_{SH}}$$



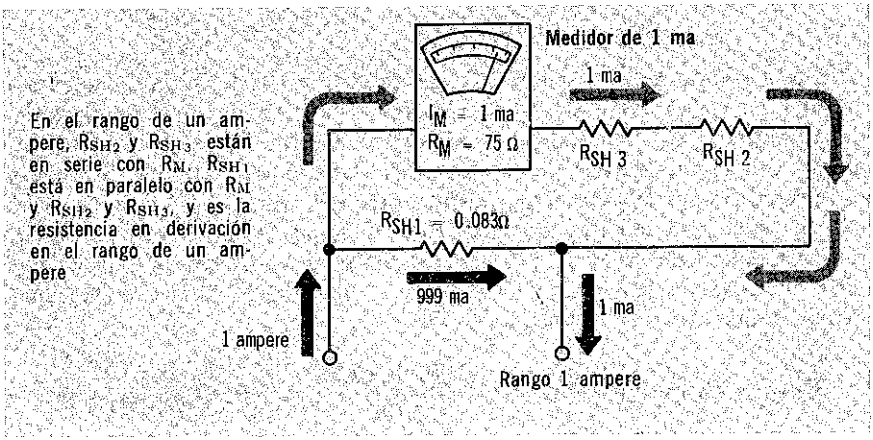
En este caso, debe recordarse que la resistencia del derivador para la escala más baja es igual a 8.33 ohms; pero que consta de tres resistencias en lugar de una sola

cálculo de la resistencia de un derivador en anillo (cont.)

Ya se determinó que la resistencia total derivada $R_{SH\ TOT}$ es 8.33 ohms y es igual a $R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} + R_{SH\ 3}$. Ahora deben determinarse los valores para cada uno de estos resistores derivados.

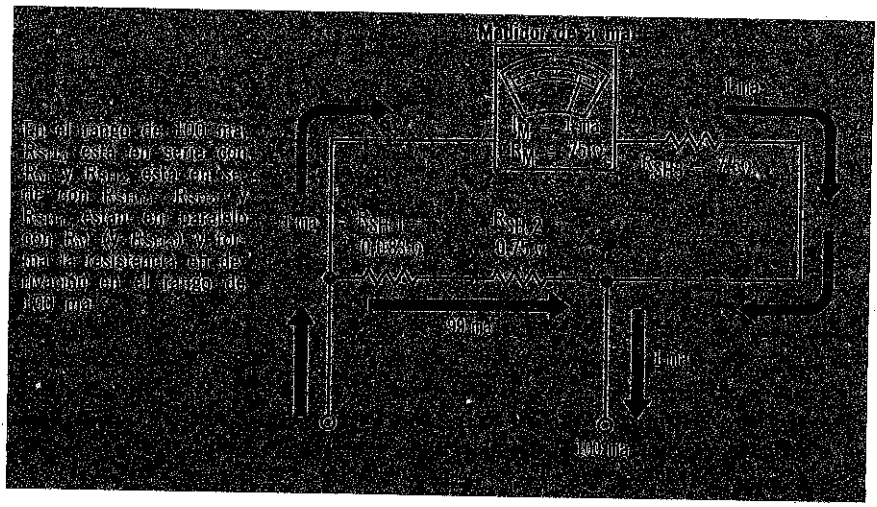
Suponga que se cambia al rango de 1 ampere. Recorriendo la trayectoria de la corriente, puede apreciarse que en este rango, $R_{SH\ 2}$ y $R_{SH\ 3}$ están en *serie* con el medidor y $R_{SH\ 1}$ puentea al medidor y a los resistores en serie. Por lo tanto, debe calcularse el valor de $R_{SH\ 1}$ que es el resistor derivado para el rango de 1 ampere. La ecuación del derivador en anillo que aparece en la página 5-65 representa una forma sencilla de calcular el valor del resistor en derivación para cualquier rango de un medidor con derivador en anillo.

$$R_{SH\ 1} = \frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}}$$



Se está usando un medidor de 1 ma, así que se sabe que I_M es igual a 1 ma. Se está calculando el resistor derivado para el rango de 1 ampere, por lo tanto, I_{TOT} es igual a 1 ampere. En la página 5-65 se ha establecido que R_{SUMA} es la *suma* de todas las resistencias en ambas ramas. Se sabe que las resistencias de un medidor (R_M) totalizan 75 ohms y en la página anterior, se determinó que la resistencia derivada total $R_{SH\ TOT}$ es igual a 8.33 ohms. Por lo tanto, el total de todas las resistencias en ambas ramas es 83.33 ohms. Se tiene ya toda la información necesaria para calcular el valor de $R_{SH\ 1}$:

$$R_{SH\ 1} = \frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}} = \frac{0.001 \times 83.33}{1} = 0.083 \text{ ohm (aprox.)}$$



cálculo de la resistencia de un derivador en anillo (cont.)

Hasta ahora se ha calculado la resistencia total del circuito de derivadores en anillo ($R_{SH\ TOT}$) y la resistencia en derivación para el rango de 1 ampere ($R_{SH\ 1}$). Ahora se analizará el circuito de derivadores en anillo, con el interruptor de rango en la posición de 100 ma. Siguiendo la trayectoria de la corriente, puede apreciarse que $R_{SH\ 3}$ está en serie con la resistencia del medidor R_M. $R_{SH\ 1}$ y $R_{SH\ 2}$ están en serie y *ambas* puentean al medidor (y $R_{SH\ 3}$). Por lo tanto, la resistencia del derivador para el rango de 100 ma es igual a $R_{SH\ 1}$ más $R_{SH\ 2}$. Mediante la ecuación del derivador en anillo, se tiene:

$$R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} = \frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}} = \frac{0.001 \times 83.33}{0.100} = 0.83 \text{ ohm (aprox.)}$$

Este es el valor de resistencia de $R_{SH\ 1}$ *más* $R_{SH\ 2}$; pero debe obtenerse primero el valor de $R_{SH\ 2}$ solamente. Puesto que se sabe que $R_{SH\ 1}$ es 0.083 ohms y que $R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} = 0.83$ ohms, entonces $R_{SH\ 2}$ debe ser la diferencia entre estos dos valores:

$$R_{SH\ 2} = 0.83 - R_{SH\ 1} = 0.83 - 0.083 = 0.75 \text{ ohm (aprox.)}$$

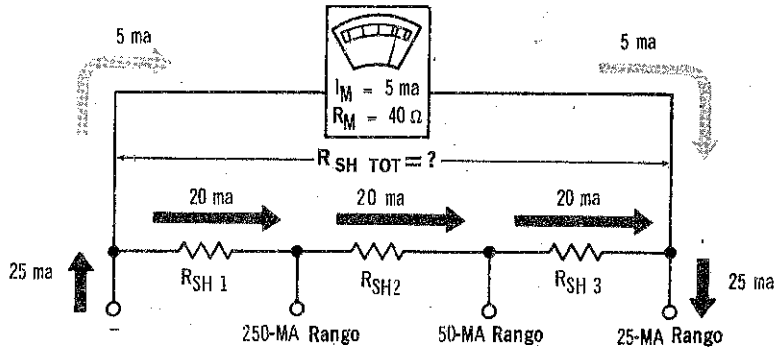
Para conocer todas las características del derivador en anillo, sólo resta determinar $R_{SH\ 3}$. Se han determinado $R_{SH\ TOT}$, $R_{SH\ 1}$, $R_{SH\ 2}$, y se sabe que

$$R_{SH\ TOT} = R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} + R_{SH\ 3}$$

Por lo tanto

$$R_{SH\ 3} = R_{SH\ TOT} - (R_{SH\ 1} + R_{SH2})$$
$$= 8.33 - (0.83) = 7.50 \text{ ohms}$$

problemas resueltos



Problema 3. Determinar en el circuito, $R_{SH\ TOT}$ y $R_{SH\ 1}$.

Cálculo de $R_{SH\ TOT}$: La ecuación del derivador en paralelo se usa para obtener la resistencia derivada total, que es la resistencia derivada para el rango más bajo (25 ma).

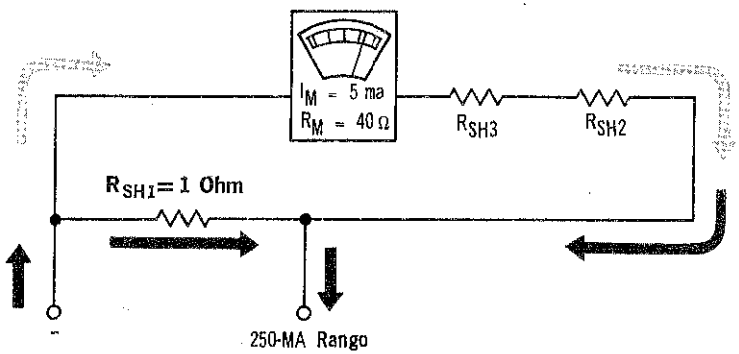
$$R_{SH\ TOT} = R_{SH\ 1} + R_{SH\ 2} + R_{SH\ 3} = \frac{I_M R_M}{I_{SH\ TOT}} = \frac{0.005 \times 40}{0.020} = 10 \text{ ohms}$$

Cálculo de R_{SUMA}: R_{SUMA} es el total de todas las resistencias en los circuitos de medidor y derivadores

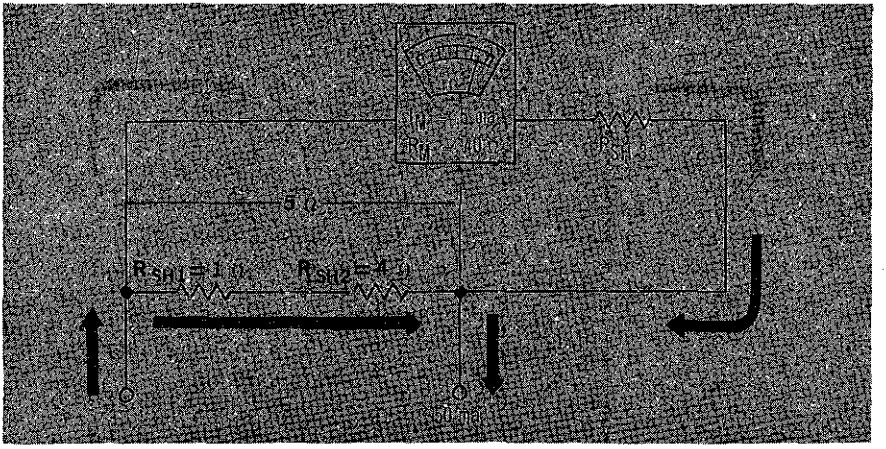
$$R_{SUMA} = R_{SH\ TOT} + R_M = 10 + 40 = 50 \text{ ohms}$$

Cálculo de $R_{SH\ 1}$: R_{SH1} es el resistor derivado para el rango de 250 ma. Mediante la ecuación de derivadores en anillo, se tiene

$$R_{SH\ 1} = \frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}} = \frac{0.005 \times 50}{0.250} = 1 \text{ ohm}$$



problemas resueltos (cont.)



Problema 4. Encontrar $R_{SH\,2}$ y $R_{SH\,3}$ para el circuito de la página 5-69.

Cálculo de $R_{SH\,1}$ y $R_{SH\,2}$: $R_{SH\,1}$ y $R_{SH\,2}$ son los resistores en derivación para el rango de 50 ma. Mediante la ecuación de derivadores en anillo, se tiene:

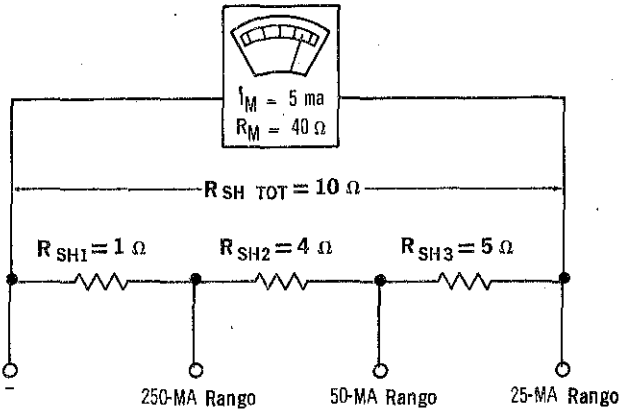
$$R_{SH\,1} + R_{SH\,2}\,\frac{I_M R_{SUMA}}{I_{TOT}} = \frac{0.005 \times 50}{0.050} = 5 \text{ ohms}$$

Cálculo de $R_{SH\,2}$: Puesto que ya se ha resuelto $R_{SH\,1}$ en el problema 3

$$R_{SH\,2} = 5 - R_{SH\,1} = 5 - 1 = 4 \text{ ohms}$$

Cálculo de $R_{SH\,3}$: Por lo tanto, a partir de la primera ecuación del problema 3, se tiene:

$$R_{SH\,3} = R_{SH\,TOT} - (R_{SH\,1} + R_{SH\,2}) = 10 - (5) = 5 \text{ ohms}$$



resumen

☐ Los medidores de alcance múltiple hacen posible medir varios rangos de corriente con un solo medidor. ☐ Un medidor de corriente de alcance múltiple tiene un medidor básico y varios derivadores diferentes que se pueden conectar en paralelo con la bobina. ☐ Suele usarse un interruptor de rango en un medidor de alcance múltiple para seleccionar el derivador adecuado para el rango de corriente deseado. ☐ El valor de resistencia de cada derivador en un medidor de alcance múltiple se puede calcular a partir de la misma ecuación que se utiliza para el valor del derivador en un medidor de rango único: $R_{SH} = I_M R_M / I_{SH}$.

☐ Muchos medidores de alcance múltiple están provistos de derivadores de anillo, en los cuales algunos de los resistores en derivación están en serie con el medidor y algunos en paralelo. ☐ En un derivador en anillo, los contactos del interruptor de rango son externos al circuito de derivadores, de manera que la resistencia de los contactos no afecta la precisión del medidor. ☐ Un derivador en anillo desconecta al medidor del circuito que se mide, cuando el interruptor cambia de una posición a otra. Esto protege al medidor evitando que la corriente total de línea pase a través de la bobina.

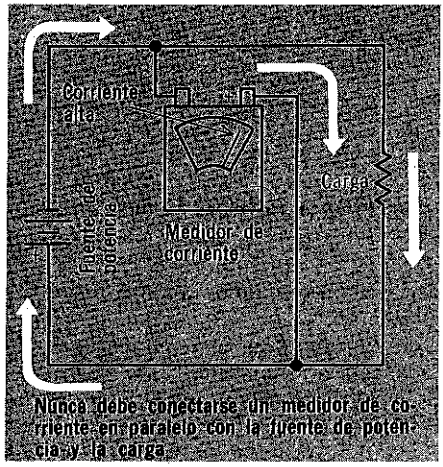
☐ La resistencia de un derivador en anillo para cada rango de un medidor de alcance múltiple se puede determinar según la ecuación: $R_{SH} = I_M R_{SUMA} / I_{TOT}$. Para la ecuación, R_{SUMA} se obtiene sumando los valores de todos los resistores en derivación en el anillo y la resistencia de la bobina del medidor.

preguntas de repaso

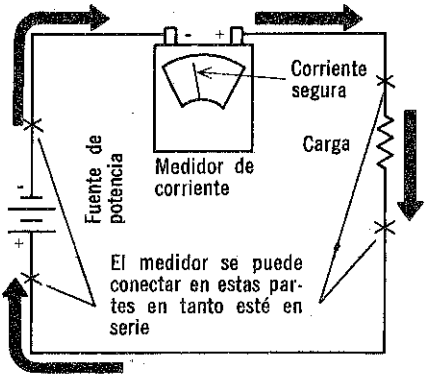
1. ¿Qué es un *medidor de corriente de alcance múltiple*? ¿Cuál es la ventaja de un medidor de este tipo?
2. ¿Qué es un *interruptor de rango*?
3. Trace el diagrama de un medidor con tres resistores en derivación en paralelo y un interruptor de rango.
4. Si en el circuito de la pregunta 3 el medidor tiene una resistencia de bobina de 50 ohms y una sensibilidad de 2 miliamperes, ¿qué valores de derivador se requieren para que el medidor tenga un rango de corriente de 0-10 miliamperes, 0-100 miliamperes o 0-1 ampere?
5. Si un medidor tiene una bobina con resistencia de 100 ohms y una sensibilidad de 1 miliampere, ¿qué valor de derivador se requiere para dar al medidor un rango de 0-1 miliampere?
6. ¿Qué es un *derivador en anillo*?
7. ¿Qué ventajas tienen los derivadores en anillo sobre los derivadores en paralelo?
8. ¿Cuál es la ecuación de derivadores en anillo?
9. Si los rangos del medidor ilustrado en la página 5-66 fueran 0-5, 0-50 y 0-500 miliamperes, ¿cuáles serían los valores de los resistores en derivación? El medidor tiene una sensibilidad de 1 miliampere.
10. ¿Qué rango de medidor requiere menor resistencia en el derivador: 0-100 miliamperes o 0-1 ampere.

conexión de un medidor de corriente en un circuito

Los medidores de corriente siempre deben *conectarse en serie* con la fuente de potencia y la carga, *nunca en paralelo* con ellas. Un medidor de corriente es un dispositivo de muy baja resistencia y la bobina móvil se puede quemar muy fácilmente, conectando el medidor a las terminales de la fuente de potencia, resistor u otra componente de circuito. La mayor parte de las componentes de circuito tienen una resistencia mucho más elevada que el medidor de corriente. Si se conecta un medidor de corriente en paralelo con una de estas componentes, se podría, en efecto, dar origen a un corto circuito, lo que resultaría en el flujo de una corriente muy elevada a través del medidor. Esta alta corriente podría dañar al instrumento. Si se usa un medidor de corriente de rango múltiple, el medidor, el derivador o ambos, podrían dañarse por el exceso de corriente. Por lo tanto, debe tenerse presente que *siempre debe conectarse un medidor de corriente en serie con la fuente de potencia y la carga.*

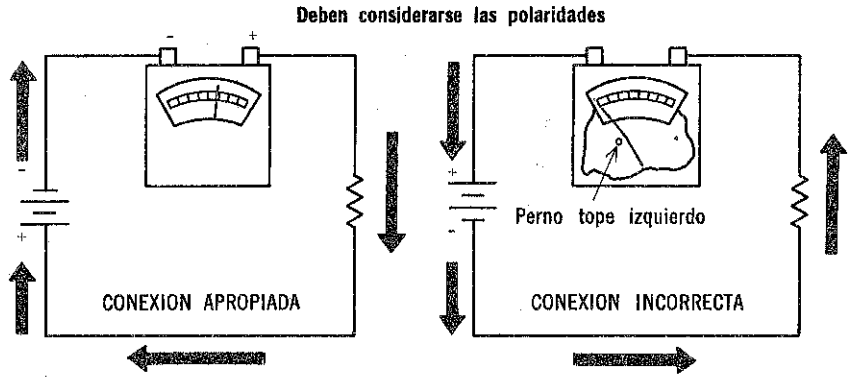


Nunca debe conectarse un medidor de corriente en paralelo con la fuente de potencia y la carga



Siempre debe conectarse un medidor de corriente en serie con una fuente de potencia y carga

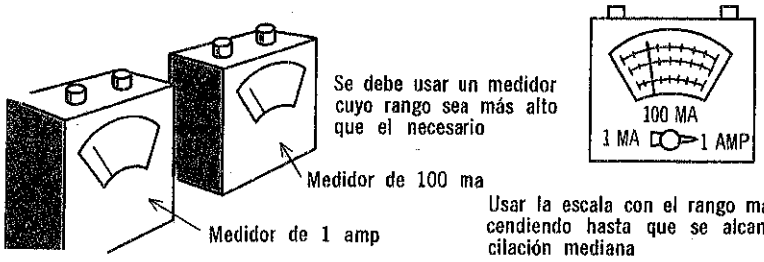
El segundo punto importante que habrá de tenerse en mente es que se debe considerar la *polaridad* cuando se mide corriente, en el caso de *c-c*. En otras palabras, debe conectarse la terminal negativa del medidor a la terminal negativa o de potencial más bajo del circuito y conectar la terminal positiva del medidor al punto de potencial alto, o positivo, en el circuito. La corriente debe fluir a través del medidor de *menos* (−) a *más* (+). Si se conecta el medidor de manera que las polaridades estén opuestas, la bobina del medidor se moverá en la dirección opuesta y la aguja golpeará al perno izquierdo de retención. No se obtendrá una lectura correcta y, en algunos casos, hasta puede doblarse la aguja.

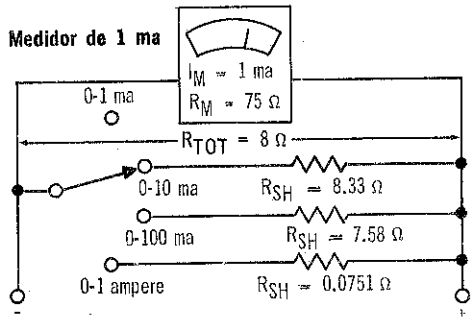


conexión de un medidor de corriente en un circuito (cont.)

No es necesario considerar la polaridad cuando se utilizan medidores de corriente que tienen la posición cero en el centro de la escala. Cuando se mide c-a, no hay necesidad de considerar la polaridad ya que ésta cambia continuamente a través de los ciclos. Por lo tanto, los medidores diseñados para usarlos solamente en c-a no tienen signos más y menos marcados en sus terminales.

Un tercer punto importante que debe tenerse presente es que no debe conectarse un medidor a un circuito salvo que se conozca aproximadamente el valor máximo de la corriente que fluye en el circuito. Los medidores frecuentemente se dañan o destruyen debido a que deben medir corrientes superiores a su sensibilidad nominal. Si no se tiene la seguridad sobre cuánta corriente fluye, hay que comprobar los diagramas del circuito y, aun así, comenzar por conectar el medidor con un rango más alto que el necesario. Si se usa un instrumento de alcance múltiple, se ajusta en su escala más alta disminuyendo el rango hasta que se lleva al que proporciona la oscilación media. Si se comienza con el rango más bajo, la aguja podría golpear el perno de retención derecho en el extremo de la escala que indica valores más altos.



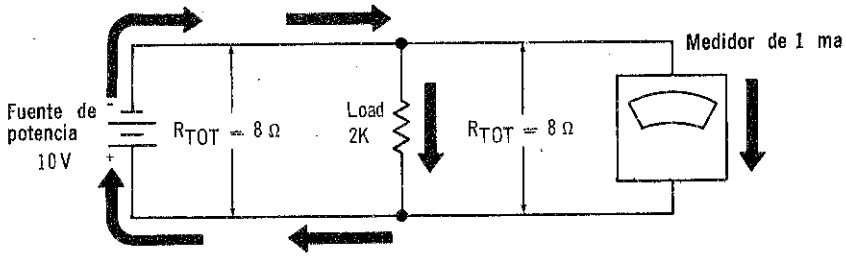


conexión en paralelo de un medidor de corriente

Para comprender cómo podría dañarse un medidor de corriente conectándolo en paralelo con una componente del circuito, se examinará este caso. Supóngase que el medidor de corriente multirrango cuyo circuito se muestra se conecta por error a las terminales de una carga de 2,000-ohms. Según la ley de Ohm, fluiría una corriente de unos 5 miliamperes a través del resistor de carga, de manera que se ajustaría al medidor en el rango de 0-10 ma. En la escala 0-10 ma, la resistencia total del medidor es de aproximadamente 8 ohms (8.33-ohms de resistencia del derivador en paralelo con una resistencia de bobina de 75 ohms, es igual a unos 8 ohms). Por tanto, se ha conectado ahora un resistor de 8 ohms en paralelo con una carga de 2,000 ohms.

Con la resistencia de 8 ohms del medidor en paralelo con la resistencia de carga de 2,000 ohms, la resistencia total del circuito *cae* aproximadamente a 8 ohms (2,000 ohms en paralelo con 8 ohms es igual a unos 8 ohms).

Con una resistencia de sólo 8 ohms conectada a una fuente de potencia de 10 volts, se tendrá una corriente de 1¼ amperes en el circuito y la mayor parte de ésta fluirá a través del medidor ya que su resistencia es muy inferior a la resistencia de carga. Como el rango del instrumento está diseñado para manejar sólo 10 miliamperes, el derivador, la bobina del medidor, o ambos, se quemarán.

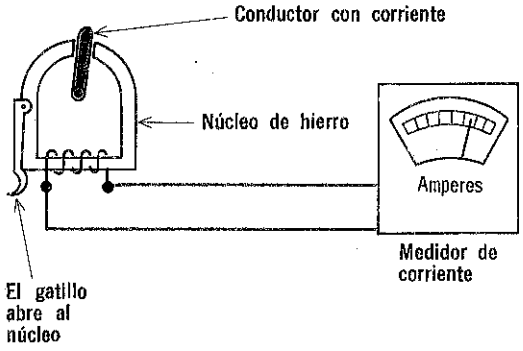


amperímetro de abrazadera

Ya se explicó que un medidor de corriente debe conectarse en serie con la fuente de potencia y la carga cuando se efectúa una medición. Con frecuencia es inconveniente y, en muchos casos, es casi imposible hacer esto. La necesidad de un medidor de corriente con capacidad para medir corrientes sin abrir el circuito para hacer una conexión estimuló la invención de un amperímetro de *abrazadera.*

El amperímetro de abrazadera consiste básicamente en un núcleo de hierro con una bobina devanada alrededor de él y un medidor de corriente similar a los que se han estudiado. Un dispositivo de gatillo en el núcleo permite abrir éste de manera que uno de los conductores del circuito que se mide se pueda colocar dentro del núcleo. Esto da origen a un transformador, donde el conductor se comporta como devanado primario de una espira y la bobina en el núcleo actúa como devanado secundario. La corriente en el conductor produce un campo magnético que, a su vez, induce corriente en el devanado secundario. La corriente fluye a través del medidor, el cual se conecta al devanado secundario para indicar la corriente que fluye en el circuito que se mide. En la mayor parte de los amperímetros de abrazadera se usa un medidor de corriente del tipo rectificador. Como se requiere acción transformadora para que funcione el amperímetro de gancho, sólo se puede medir corriente alterna.

Con un amperímetro de abrazadera el circuito a probar no necesita ser interrumpido para insertar el medidor. El campo magnético alrededor del conductor induce voltaje en el devanado que luego da una corriente inducida al medidor. Este medidor es útil particularmente para mediciones de corrientes elevadas

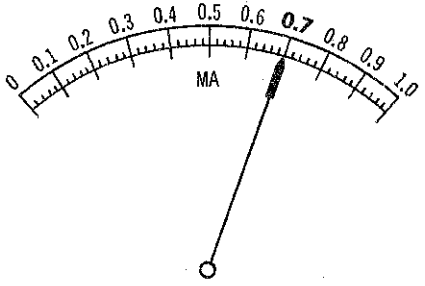


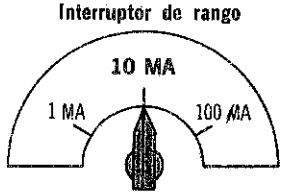
La intensidad del campo magnético alrededor del conductor es proporcional al número de espiras que haya en éste y la intensidad de la corriente que lo atraviesa. Como en este caso el conductor tiene sólo una espira, la corriente dentro de él debe ser alta para producir un campo magnético suficientemente elevado, para poner a funcionar el medidor. Por lo tanto, normalmente se usan amperímetros de abrazadera para medir corrientes en amperes. Son especialmente útiles para medir corrientes muy elevadas. Por ejemplo, cientos de amperes, debido a que estas corrientes no fluyen a través del medidor o derivadores del mismo.

lectura de la escala

No es ningún problema leer la escala en un medidor de corriente de rango único, como el que se ilustra en la página 5-29. Puesto que el medidor sólo mide un rango de corriente, sólo se requiere un conjunto de valores en la escala. Sin embargo, algunos medidores de corriente de alcance múltiple tienen también un solo grupo de valores en la escala, aunque miden varios rangos de corriente. Cuando éste sea el caso, hay que multiplicar la lectura de la escala por el ajuste del interruptor de rango. Por ejemplo, si la escala está calibrada en valores de 0 a 1 miliampere y el interruptor de rango está en la posición de 0-1 miliampere, la corriente se leerá directamente. Sin embargo, si el interruptor de rango está en la posición de 0-100 miliamperes, se multiplicará la lectura de la escala por 100 para determinar la cantidad de corriente que fluye en el circuito.

Algunos medidores de corriente de rango múltiple sólo tienen un grupo de valores marcados en la escala

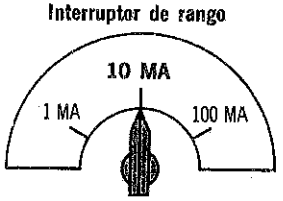




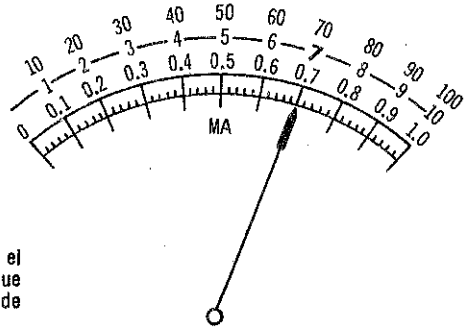
Para determinar la corriente que pasa en el circuito, hay que multiplicar la lectura de la escala por el ajuste del interruptor de rango: corriente = 0.7 x 10 ma = 7 ma

Otros medidores de corriente tienen un conjunto de valores separados en la escala para cada posición del interruptor de rango. En este caso, hay que asegurarse que se lee el conjunto de valores que corresponde al ajuste del interruptor de rango.

Algunos medidores de corriente de rango múltiple tienen un conjunto de valores para cada posición del interruptor



Para determinar la corriente que pasa en el circuito, se lee la escala del medidor que corresponde a la posición del interruptor de rango: corriente = 7 ma

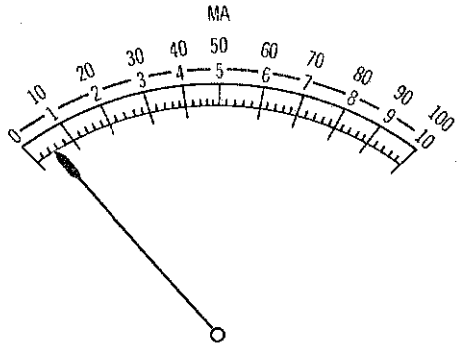


parte útil de la escala

Aunque la corriente que fluye en un circuito se puede leer en cualquier parte sobre la escala de cero a oscilación total, cuanto más cerca se encuentre la aguja de su oscilación total, más precisa será la lectura. Anteriormente se ha especificado la precisión de un medidor como el porcentaje de error a *plena escala*. Por ejemplo, si la precisión especificada para un medidor de 100 miliamperes es ±2 por ciento, la lectura del medidor puede tener una exactitud de ±2 miliamperes a plena escala. No obstante, el error en el medidor es fijo; esto es, si puede desviarse hasta ±2 miliamperes en 100 ma, puede desviarse hasta ±2 miliamperes para cualquier lectura inferior a la escala plena. Por lo tanto, aunque la precisión de un medidor está especificada a oscilación total, debe tenerse presente que el porcentaje de error se vuelve progresivamente más alto al aproximarse a cero.

Mientras mayor sea la oscilación más precisa será la lectura

El medidor tiene una precisión a oscilación de escala plena de ± 2%. El error en la escala de 0-100 ma es ± 2 ma, y el error en la escala 0-10 es ± 0.2 ma. Por lo tanto, se obtendrá una lectura más precisa haciendo la medición en la escala que dé la oscilación máxima. Para una lectura de 5 ma, convendrá usar la escala de 0-10



Considerando lo anterior, si se sabe que la corriente por medir debe ser de unos 5 miliamperes y se tiene un medidor con un rango de 0-10 y 0-100 miliamperes, debe usarse el rango de 0-10 miliamperes debido a que la lectura se aproximará más a la oscilación total de la escala. En forma similar, si se tienen dos medidores; uno con un rango de 0-10 miliamperes y el otro con un rango de 0-100 miliamperes, debe usarse el de rango 0-10 miliamperes para obtener una mayor oscilación y, por lo tanto, mayor precisión.

Otra razón para seleccionar la escala que proporciona la mayor oscilación es que es más fácil juzgar la lectura en la escala más baja si la aguja no queda en una graduación. Por ejemplo, como puede apreciarse, es mucho más fácil distinguir entre valores de 5 y 6 miliamperes en la escala de 0-10 miliamperes de lo que lo sería en la escala de 0-100 miliamperes.

resumen

☐ Un medidor de corriente siempre debe conectarse en serie con la fuente de potencia y la carga. Si se conecta en paralelo con cualquiera de las componentes, puede tenerse un flujo de corriente demasiado elevado en el medidor y dañar su mecanismo o el derivador. ☐ Cuando se usa un medidor para medir corriente continua debe considerarse la polaridad: debe conectarse de manera que el flujo de corriente a través del medidor sea desde la terminal negativa del medidor hasta la positiva. ☐ No es necesario considerarse la polaridad cuando se usa un medidor cuya posición cero se encuentra en el centro de la escala. ☐ Como la polaridad de la corriente alterna cambia continuamente, no es necesario observar la polaridad cuando se mide c-a.

☐ Nunca debe conectarse un medidor en un circuito, a menos que se conozca aproximadamente la corriente que fluye dentro de éste y que el medidor pueda manejar ese rango. ☐ Cuando se usa un medidor de alcance múltiple se comienza con el rango más alto, reduciéndolo hasta que se obtiene el más adecuado. ☐ Se pueden usar amperímetros de abrazadera para hacer mediciones de corriente sin abrir el circuito.

☐ Los medidores de corriente de rango único tienen marcada sólo una escala de valores. ☐ Algunos medidores multirrango tienen en su escala sólo un conjunto de valores. La lectura real se obtiene multiplicando la lectura de la escala por el punto de ajuste del interruptor de rango. ☐ Muchos medidores multirrango tienen un conjunto separado de valores en la escala para cada rango de corriente. ☐ Con un medidor multirrango, el mejor rango para una lectura con precisión máxima y mejor legibilidad es aquel que proporciona una oscilación próxima a la total.

preguntas de repaso

1. ¿Por qué nunca debe conectarse un medidor de corriente en paralelo con una fuente de potencia o carga?
2. ¿Qué significa "considerar la polaridad" cuando se conecta un medidor de corriente?
3. ¿Para qué tipo de medidor de corriente continua no es necesario considerar la polaridad?
4. ¿Debe observarse la polaridad cuando se mide c-a? ¿Por qué?
5. Si se ignora el valor aproximado de la corriente que se mide, ¿cómo debe procederse con un medidor multirrango?
6. ¿Qué es un *amperímetro de abrazadera*?
7. ¿Cuál es la ventaja principal de un amperímetro de abrazadera?
8. ¿Se puede usar un amperímetro de abrazadera para medir corrientes muy pequeñas? ¿Por qué?
9. ¿Es correcto medir una corriente de 95 miliamperes con el rango de 0-10 miliamperes, 0-100 miliamperes o 0-1 ampere en un medidor multirrango?
10. Explique las razones de la respuesta a la pregunta 9.

uso de un medidor de corriente para medir voltaje

Un medidor básico que esencialmente sirve para medir corriente, ya sea de c-a o de c-c, también es útil para medir voltaje, ya que la bobina de cualquier medidor tiene una resistencia fija y, por lo tanto, cuando fluye corriente a través de la bobina, se producirá una caída de tensión en esta resistencia. Según la ley de Ohm, la caída de tensión será proporcional a la corriente que fluye a través de la bobina ($E = IR$). Por ejemplo, suponga que se tiene un medidor de corriente de 0-1 miliampere con una resistencia de bobina de 1,000 ohms. A oscilación total, es decir, cuando fluye 1 miliampere a través de la bobina del medidor, el voltaje originado en la resistencia de la bobina será el siguiente:

$$E = I_M R_M = 0.001 \times 1{,}000 = 1 \text{ volt}$$

Si sólo fluyera la mitad de esa corriente (0.5 miliamperes) a través de la bobina, entonces el voltaje en la bobina sería:

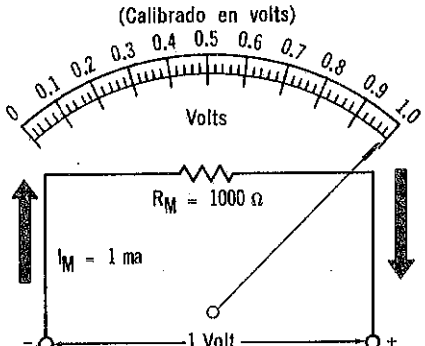
$$E = I_M R_M = 0.0005 \times 1{,}000 = 0.5 \text{ volt}$$

Nótese, pues, que la tensión en la bobina es proporcional a la corriente que fluye en la bobina. Además, la corriente que fluye a través de la bobina es proporcional al voltaje aplicado a la bobina. Por lo tanto, calibrando la escala del medidor en unidades de voltaje en lugar de unidades de corriente, se pueden medir los voltajes en varias partes de un circuito.

Aunque el medidor de corriente puede inherentemente medir voltaje, su utilidad queda limitada debido a que la corriente que puede manejar el medidor, así como la resistencia de su bobina, son muy bajas. Por ejemplo, el máximo voltaje que se podría medir con el citado medidor de 1 miliampere como el que se ha estudiado antes, es de 1 volt. En la práctica suele ser necesario hacer mediciones mucho mayores que 1 volt.

Puesto que el voltaje aplicado a la resistencia de la bobina del medidor es proporcional a la corriente que pasa por la bobina, el medidor de corriente de 1 ma puede medir directamente el voltaje si se calibra la escala del medidor en las unidades de voltaje que producen las corrientes en la bobina

$$E = I_R R_M = 0.001 \times 1000 = 1 \text{ volt}$$



resistores multiplicadores

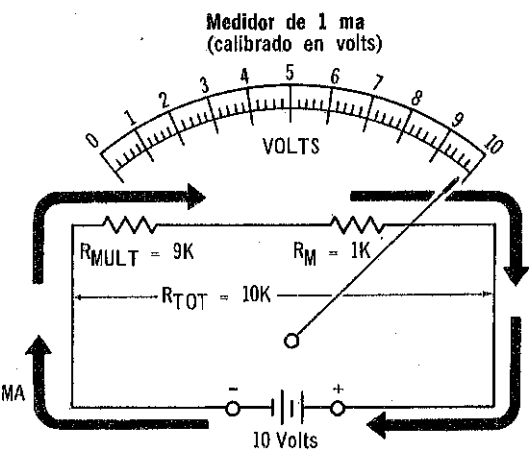
Como un medidor básico de corriente sólo puede medir tensiones muy pequeñas, ¿cómo mide tensiones más altas que la caída $I_M R_M$ en la resistencia de la bobina? El rango de voltaje de este medidor se puede ampliar agregando un resistor llamado *resistor multiplicador*, en serie. El valor de este resistor es tal que, cuando se agrega a la resistencia de la bobina del medidor, la resistencia total limita la corriente a la capacidad de corriente a plena escala del medidor, para cualquier voltaje aplicado. Por ejemplo, supóngase que se desea usar el medidor de 1 miliampere, en ohms, para medir voltajes hasta de 10 volts. Según la ley de Ohm, es fácil concluir que si se conecta dicho medidor a una fuente de 10 volts, se tendría una corriente de 10 miliamperes en el medidor y probablemente éste se arruinaría ($I = E/R = 10/1{,}000 = 10$ miliamperes). Pero es posible limitar la corriente del medidor a 1 miliampere si se agrega un resistor multiplicador (R_{MULT}), en *serie* con la resistencia del medidor (R_M). Como sólo puede fluir 1 miliampere como máximo a través del medidor, la resistencia total del resistor multiplicador y el medidor ($R_{TOT} = R_{MULT} + R_M$) debe limitar la corriente a 1 miliampere. Aplicando la ley de Ohm, la resistencia total es la siguiente:

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 10 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 10{,}000 \text{ ohms}$$

Pero ésta es la resistencia *total* necesaria. La resistencia multiplicadora es la siguiente:

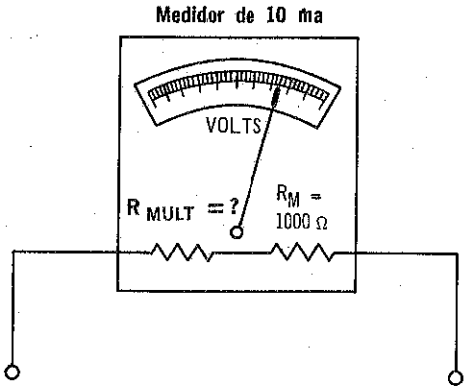
$$R_{MULT} = R_{TOT} - R_M = 10{,}000 - 1{,}000 = 9{,}000 \text{ ohms}$$

Ahora se puede usar el medidor de 1 miliampere, 1,000 ohms, para medir de 0-10 volts, ya que deben aplicarse 10 volts para producir una oscilación de toda la escala. Sin embargo, la escala del medidor debe calibrarse nuevamente; ahora de 0-10 volts o si se usa la escala anterior, se deben multiplicar todas las lecturas por 10.



Conectando una resistencia multiplicadora en serie con la resistencia de un medidor, se puede ampliar el rango del medidor para medir voltajes más altos que la caída de voltaje $I_M R_M$ en la bobina del medidor

problemas resueltos



Problema 5. Con el medidor ilustrado, ¿qué valor debe tener el resistor multiplicador para medir 0-10 volts?

Cálculo de la resistencia total (R_{TOT}): la resistencia total limita la corriente que fluye a través del medidor a 10 miliamperes, cuando el voltímetro se conecta a una fuente de 10 volts. Según la ley de Ohm, tenemos

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 10 \text{ volts}/0.01 \text{ ampere} = 1{,}000 \text{ ohms}$$

Cálculo de la resistencia multiplicadora (R_{MULT}): Puesto que $R_{TOT} = R_{MULT} + R_M$,

$$R_{MULT} = R_{TOT} - R_M$$

Se ha resuelto R_{TOT} teniendo como dato R_M. Por lo tanto

$$R_{MULT} = 1{,}000 - 1{,}000 = 0 \text{ ohms}$$

Por lo tanto, el medidor puede medir 10 volts sin resistor multiplicador.

Problema 6. Con el medidor ilustrado, ¿qué valor debe tener el resistor multiplicador para medir 0-25 volts?

Cálculo de la resistencia total (R_{TOT}): La resistencia total limita la corriente que fluye en el medidor a 10 miliamperes cuando el voltímetro se conecta a 25 volts. Según la ley de Ohm, tenemos:

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 25 \text{ volts}/0.01 \text{ ampere} = 2{,}500 \text{ ohms}$$

Cálculo de la resistencia multiplicadora (R_{MULT}): Puesto que $R_{TOT} = R_{MULT} + R_M$:

$$R_{MULT} = R_{TOT} - R_M = 2{,}500 - 1{,}000 = 1{,}500 \text{ ohms}$$

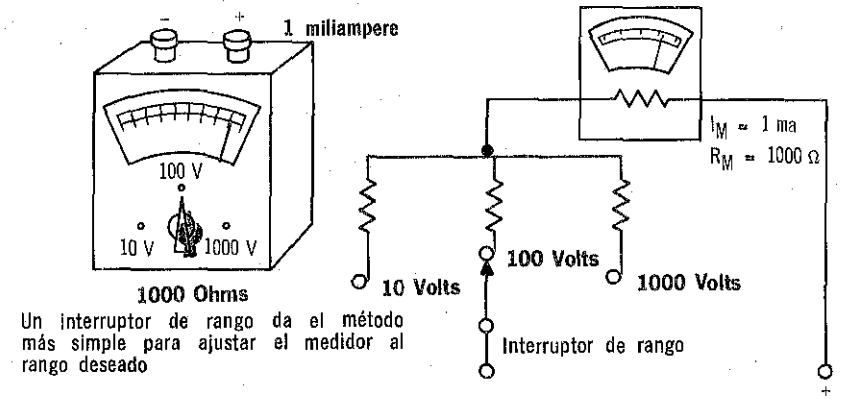
La resistencia multiplicadora necesaria para que el voltímetro mida 25 volts, es de 1,500 ohms.

voltímetros de alcance múltiple

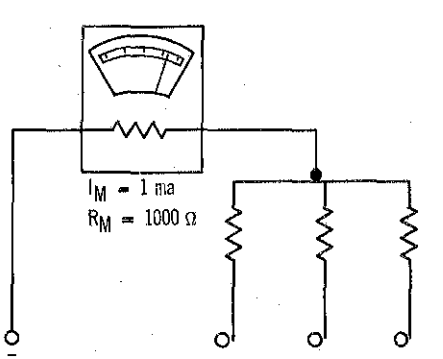
Se ha estudiado previamente que, en muchos casos, no es práctico usar medidores de corriente de un solo rango al trabajar con equipo eléctrico y electrónico. Lo mismo ocurre con los voltímetros. En muchos tipos de equipo, se encontrarán voltajes de unos cuantos décimos de volt hasta cientos y aun miles de volts. El uso de medidores de un solo rango en estos casos sería impráctico y costoso. Por ello se emplean *voltímetros de alcance múltiple*, los cuales pueden medir varios rangos de tensión.

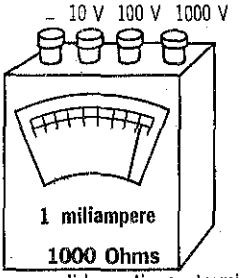
Un voltímetro de alcance múltiple tiene varios resistores multiplicadores que se pueden conectar en serie con él. Igual que en el caso de medidores de corriente multirrango, se usa un interruptor para conectar el resistor o resistores apropiados al rango deseado. Además, en algunos casos se pueden contar con terminales separadas para cada rango, montada en la caja del medidor.

El rango de este medidor de 1000 ohms, que sólo puede medir 0-1 volts, se ha ampliado para medir 0-10, 0-100 y 0-1000 volts, usando resistencias multiplicadoras para cada rango



Un interruptor de rango da el método más simple para ajustar el medidor al rango deseado





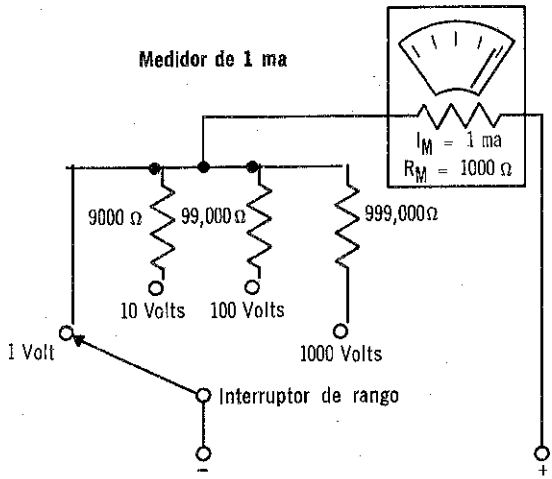
Algunos medidores tienen terminales separadas para ajustar el instrumento al rango requerido

cálculo de la resistencia de multiplicadores de alcance múltiple

Existen dos métodos para calcular valores de resistores multiplicadores para un voltímetro de alcance múltiple. En el primer método, cada uno de los multiplicadores se calcula en la misma forma que para un voltímetro de rango único. Supóngase que se desea extender el rango de un medidor de 1 miliampere para medir 0-10, 0-100 y 0-1,000 volts, y que también se desea un rango de 0-1 volt. Como la oscilación total de la escala es igual a 1 volt en el rango de 0-1 volt ($E = I_M R_M = 0.001$ ampere $\times$ 1,000 ohms = 1 volt), no necesita multiplicador. La resistencia total (R_{TOT}) necesaria para limitar la corriente del medidor (I_M) a 1 miliampere en la escala de 0-10 volts, es

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 10 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 10{,}000 \text{ ohms}$$

Puesto que la resistencia del medidor (R_M) es 1,000 ohms, entonces la resistencia multiplicadora (R_{MULT}) es 9,000 ohms.



El rango del medidor de 1000 ohms se amplió para medir 0-10, 0-100 y 0-1000 volts simplemente encontrando la resistencia total necesaria para cada rango, para limitar la corriente del medidor a 1 ma y luego restando la resistencia del medidor del valor, para obtener la resistencia del multiplicador en un rango particular

El mismo procedimiento se sigue para determinar el resistor multiplicador para el rango de 0-100 volts:

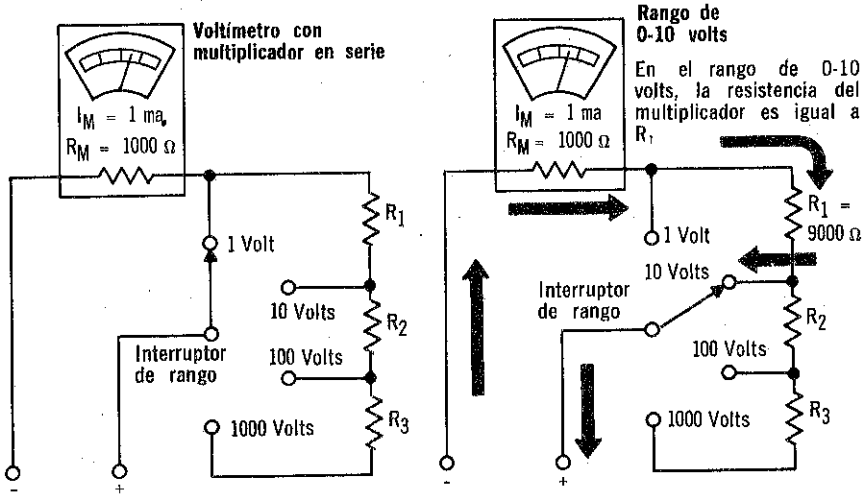
$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 100 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 100{,}000 \text{ ohms}$$
$$R_{MULT} = R_{TOT} - R_M = 100{,}000 - 1{,}000 = 99{,}000 \text{ ohms}$$

En forma semejante para la escala de 0-1,000 volts:

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 1{,}000 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 1.000{,}000 \text{ ohms}$$
$$R_{MULT} = R_{TOT} - R_M = 1.000{,}000 - 1{,}000 = 999{,}000 \text{ ohms}$$

cálculo de la resistencia de multiplicadores de alcance múltiple

Un segundo método para calcular los valores de los resistores multiplicadores para voltímetro es el de *disposición en serie multiplicadora* en la cual los resistores multiplicadores están conectados en serie. Como se muestra, R_1 es el resistor multiplicador para el rango de 0-10 volts. Para el rango de 0-100 volts, R_1 está *en serie* con R_2. Por lo tanto, el valor de la resistencia multiplicadora correspondiente al rango de 0-100 volts es igual a R_1 *más* R_2. En forma similar la resistencia multiplicadora para el rango 0-1,000 volts es igual a R_1 *más* R_2 *más* R_3. En este punto, probablemente el lector se dé cuenta de que la disposición en serie multiplicadora es similar a la disposición de derivadores en anillo para medidores de corriente que se ha examinado anteriormente.



Ahora se calcularán los valores para un voltímetro con serie multiplicadora. Se usará el mismo medidor de miliampere y 1,000 ohms, usado anteriormente. Como este medidor indica que 1 volt es para una oscilación total de la escala, no se necesita resistor multiplicador para el rango de 0-1 volt. Por tanto, el primer paso es calcular la resistencia multiplicadora necesaria para el rango de 0-10 volts. También en este caso, gracias a la ley de Ohm se obtiene la resistencia total (R_{TOT}) necesaria para limitar la corriente del medidor (I_M) a 1 miliampere, en este rango.

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 10 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 10{,}000 \text{ ohms}$$

Por tanto, el resistor multiplicador R_1 para el rango de 0-10 volts, es igual a 10,000 ohms menos la resistencia de 1,000 ohms del medidor, o sean 9,000 ohms. Hasta ahora, el procedimiento es idéntico al del otro método y el valor del resistor multiplicador es el mismo para el rango de 0-10 volts.

cálculo de la resistencia de multiplicadores de alcance múltiple

Una vez determinados los multiplicadores en serie para los rangos de 0-1 y 0-10 volts, se calculará la resistencia total necesaria para el rango de 0-100 volts:

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 100 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 100{,}000 \text{ ohms}$$

Restando la resistencia del medidor de la resistencia total, resulta que la resistencia multiplicadora para el rango de 0-100 volts es 99,000 ohms. Hasta ahora, este método es igual que el anterior; pero ahora la resistencia multiplicadora está formada de R_1 *más* R_2 en serie. Por lo tanto, como se necesitan 99,000 ohms para la resistencia multiplicadora y R_1 es igual a 9,000 ohms, R_2 debe ser igual a 90,000 ohms.

En forma similar para el rango de 0-1,000 volts.

$$R_{TOT} = E_{MAX}/I_M = 1{,}000 \text{ volts}/0.001 \text{ ampere} = 1.000{,}000 \text{ ohms}$$

Así pues, $R_{MULT} = R_{TOT} - R_M = 1.000{,}000 - 1{,}000 = 999{,}000$ ohms

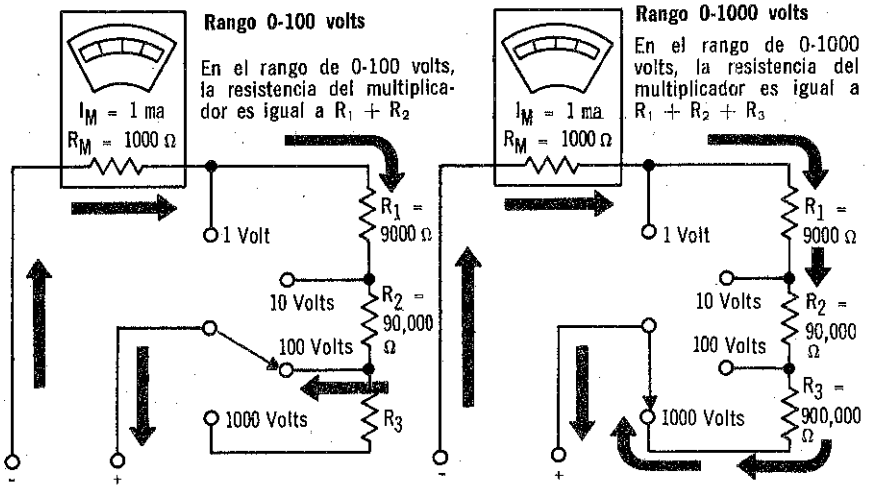
Pero, $R_{MULT} = R_1 + R_2 + R_3$. Así pues,

$$R_{MULT} = 999{,}000 \text{ ohms} = 9{,}000 + 90{,}000 + R_3$$

y

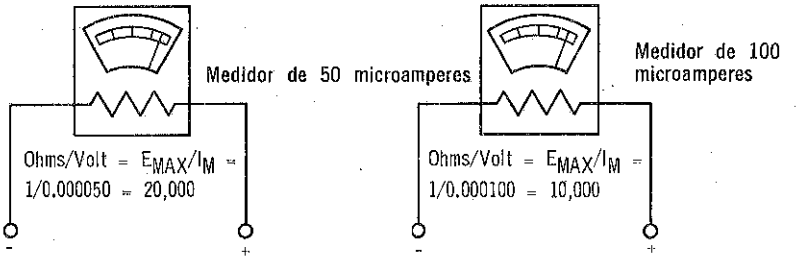
$$R_3 = 999{,}000 - 99{,}000 = 900{,}000 \text{ ohms}$$

Independientemente del método que se use, el valor de la resistencia multiplicadora para cada rango sigue siendo el mismo. Sin embargo, en el primer método, el multiplicador es un solo resistor, mientras que en el segundo en todos los rangos excepto en la ampliación del primero, se forma de varios resistores en serie.



clasificación "ohms por volt"

Una característica importante de cualquier voltímetro es su *impedancia* o clasificación ohms por volt (ohms/volt). La clasificación ohms/volt es una indicación de la sensibilidad del voltímetro y cuanto más alta sea la clasificación, más sensible será el medidor. La clasificación ohms/volt se define como la resistencia ($R_M + R_{MULT}$) necesaria para la oscilación total de la escala. Por ejemplo, el medidor de 1 miliampere, 1,000 ohms que se ha estado usando indica 1 volt con oscilación plena. Por lo tanto, la clasificación ohm/volt es 1,000/1, ó 1,000 ohms/volt.



El voltímetro de la izquierda es más sensible que el de la derecha debido a que ofrece mayor resistencia para obtener una deflexión de un punto; o, puesto de otra manera, requiere menos corriente del circuito que mide para deflexión completa

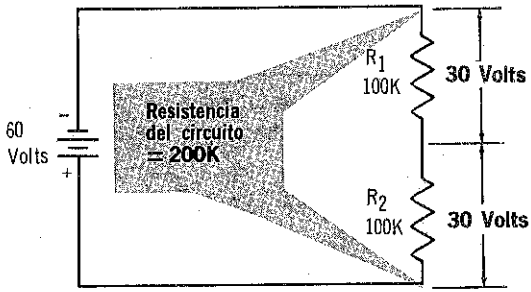
La clasificación ohms/volt es una característica inherente de un medidor y permanece invariable para todos los rangos de un voltímetro de rango múltiple. Por ejemplo, cuando se amplió el rango del medidor de 1 miliampere, 1,000 ohms para medir 0-10 volts, se conectó un resistor de 9,000 ohms en serie con la resistencia del medidor de 1,000-ohms. Aunque la resistencia total (R_{TOT}) se convierte ahora en 10,000 ohms, la tensión para oscilación total es de 10 volts en lugar de 1 volt. Por lo tanto, la característica ohms/volt permanece invariable (ohms/volt = = 10,000/10 = 1,000 ohms/volt).

Ahora se examinará el medidor de 50-microamperes. La resistencia de este medidor, necesaria para una oscilación total con un volt es $R_{TOT} = G_{MAX} = I_M = 1/0.000050 = 20{,}000$ ohms. Así pues, se dice que el medidor tiene una sensibilidad de 20,000 ohms/volt.

Aunque la clasificación ohms/volt es la misma para todos los rangos de un voltímetro multirrango, la resistencia total aumenta al aumentar el rango. La resistencia total para cualquier rango es la clasificación ohms/volt del medidor básico, multiplicado por la oscilación total de la escala, en ese rango. Por ejemplo, la resistencia total en el rango 0-100 volt de un medidor de 20,000 ohms/volt es igual a $20{,}000 \times 100$, ó 2.000,000 ohms (2 megohms). Un voltímetro clasificado como 1,000 ohms/volt sólo tendría una resistencia total de 100,000 ohms en el rango de 0-100 volts.

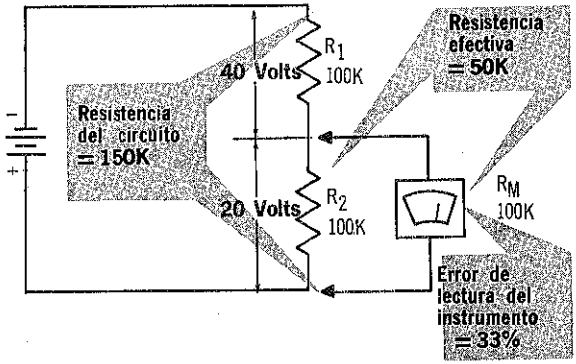
clasificación baja de ohms por volt

Cuando un voltímetro de baja clasificación ohms/volt se usa para medir una tensión en una alta resistencia, las condiciones del circuito pueden alterarse de manera que pueda resultar una lectura de tensión completamente inexacta. Por ejemplo, considérense dos resistores de 1,000 K-ohm conectados en serie a una fuente de potencia de 60 volts. Como los resistores son de igual valor, se tendrá una caída de 30 volts en cada uno de ellos.



Puesto que R_1 y R_2 son iguales, se establecen 30 volts en cada resistor

Ahora se conecta el medidor de 1,000 ohms-volt a R_2 y se ajusta el medidor en el rango de 0-100 volts. Según se ha visto, la resistencia total del medidor es igual a la clasificación ohms/volt multiplicada por la lectura a escala total de rango. Por lo tanto, en el rango de 0-100 volts, la resistencia total es igual a 1,000 × 100 ó 100 K-ohms. Cuando el medidor se conecta a las terminales de R_2, se tienen dos resistores de 100 K-ohms en paralelo, lo que es igual a 50 K-ohms. Como resultado, la resistencia total del circuito es ahora de sólo 150 K-ohms. El resistor R_2 y el medidor tienen ahora la tercera parte de la resistencia total del circuito y, por lo tanto, el medidor sólo marcará 20 volts en R_2, lo que representa un error del 33 por ciento.

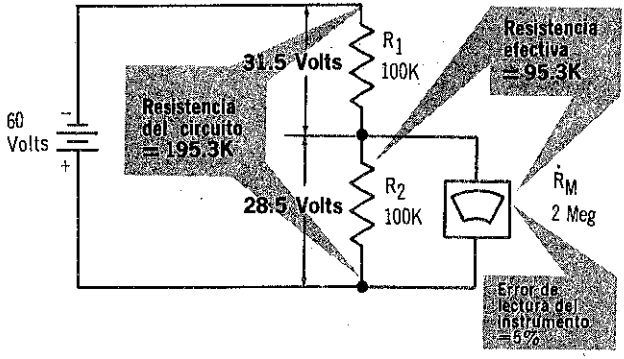


En el rango de 0-100 volts de un instrumento de 1000 ohms/volt, la resistencia total del instrumento es de 100 K ohms. La resistencia efectiva de R_2 y el instrumento es 50 K ohms. La resistencia total del circuito es ahora de sólo 150 K ohms. Por lo tanto, sólo 1/3 del voltaje de la fuente, o sea 20 volts, aparece como lectura en el instrumento, un error de 33%

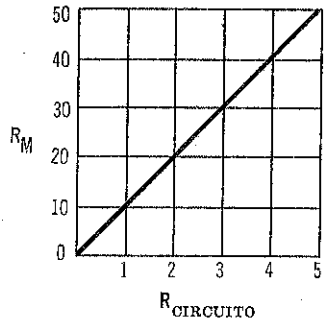
clasificación baja de ohms por volt

Conéctese ahora un medidor de 20,000 ohms/volt a R_2 y ajústese al rango de 0-100 volts. Un medidor de 20,000 ohms/volt en el rango de 0-100 volts tendrá una resistencia total de 2 megohms ($20,000 \times 100 = 2.000,000$). La resistencia en paralelo de la resistencia de 2 megohms del medidor y la resistencia de 100 K-ohm del circuito (R_2) es 95.3 K-ohms. Por lo tanto, la resistencia en serie del circuito resulta sólo ligeramente afectada y el medidor se leerá como casi 30 volts en R_2. En realidad, indicaría aproximadamente 28.5 volts en R_2, lo que representa un error de un 5 por ciento.

En el rango de 0-100 volts de un instrumento de 20 000 ohms/volt, la resistencia total del instrumento es de 2 megohms. La resistencia efectiva de R_2 y del instrumento es de 95.3 K ohms. La resistencia total del circuito es ahora de 195.3 K ohms, aproximadamente la misma que si el instrumento no estuviese conectado. La lectura del instrumento será de 28.5 volts o un error de 5%



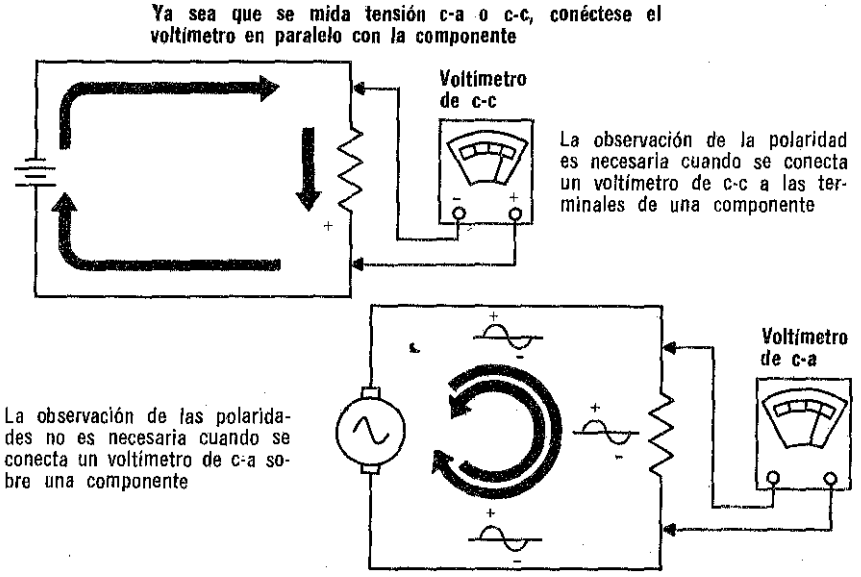
Si se usa un medidor con una clasificación aún más alta de ohms/volt, por ejemplo 100,000 ohms/volt, el error en la lectura de tensión hubiese sido inferior al 1 por ciento. Por lo tanto, la clasificación ohms/volt del medidor que se usa determina el tipo de circuito sobre el cual debe usarse. La clasificación ohms/volt debe ser alta para circuitos de alta impedancia. En realidad, la resistencia total del medidor en el rango usado debe ser aproximadamente de 10 veces la resistencia del circuito que se está probando para obtener una lectura precisa. De otra suerte, se debe *interpretar* la lectura basada en los efectos del medidor.



La resistencia total del instrumento debe ser por lo menos 10 veces la del circuito

conexión de un voltímetro a un circuito

Los voltímetros deben usarse en paralelo con la componente del circuito que se mide. A diferencia del medidor de corriente, el voltímetro está menos expuesto a ser dañado si se conecta incorrectamente. En los rangos más altos, la corriente que fluye a través del medidor se reduce considerablemente debido a su alta resistencia total inherente. Sin embargo, la lectura resultará errónea si se conecta un voltímetro en serie con una componente de circuito en lugar de en paralelo.



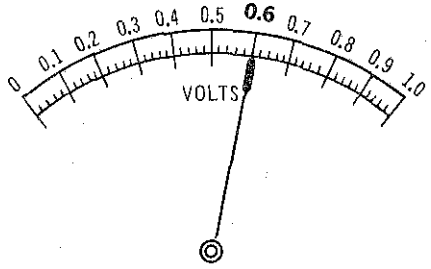
Cuando se conecta un voltímetro a c-c siempre debe observarse que se establezca la polaridad correcta. La terminal negativa del instrumento debe conectarse a la punta negativa o de potencial bajo de la componente y la terminal positiva a la junta positiva o de alto voltaje de la componente. Igual que en el caso del medidor de corriente, si se conecta el voltímetro a la componente con polaridad opuesta, la bobina del medidor se moverá hacia la izquierda y la aguja puede doblarse al golpear el perno de retención izquierdo. Tampoco en este caso los efectos tienen lugar en medidores con cero central.

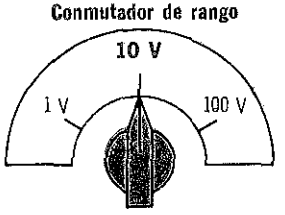
En un circuito de c-a, la tensión continuamente invierte su polaridad. Por lo tanto, no hay necesidad de considerar la polaridad cuando se conecta un voltímetro a una componente en un circuito de c-a.

lectura de la escala de un voltímetro

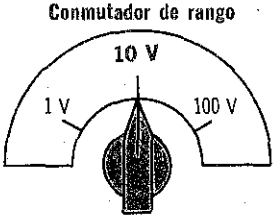
La lectura de la escala de un voltímetro es tan fácil como la lectura de escala de un medidor de corriente. Algunos voltímetros multirrango sólo tienen un rango de valores marcados en la escala y la lectura debe multiplicarse por la indicación de ajuste del interruptor de rango para obtener la tensión correcta. Otros voltímetros tienen rangos separados en la escala para cada posición del interruptor de rango. Cuando estos instrumentos se usan, hay que asegurarse de que se lea el conjunto de valores que corresponde a la graduación del interruptor de rango.

Cuando se estudiaron medidores de corriente, se observó que la precisión del aparato se basaba en la oscilación de toda la escala. Si el medidor tuviese una precisión dentro de ±2 por ciento, entonces toda lectura en la escala de 0-100 volts sería imprecisa hasta por ±2 volts. Por lo tanto, se indicó que el uso de una escala, la cual registraría una lectura tan próxima como fuese posible a la oscilación total debido a que el *porcentaje de error* disminuye al aproximarse la lectura a la escala plena. Sin embargo, hay otro factor, la resistencia total del voltímetro en cada rango, la cual debe considerarse cuando se hacen mediciones de tensión.

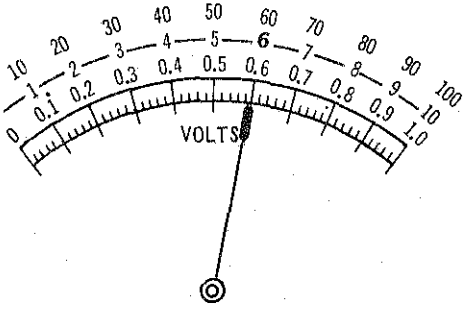




Para encontrar el voltaje en una componente, multiplíquese la lectura de la escala por el ajuste del conmutador de rango: voltaje = 0.6 × 10 = 6.0 volts

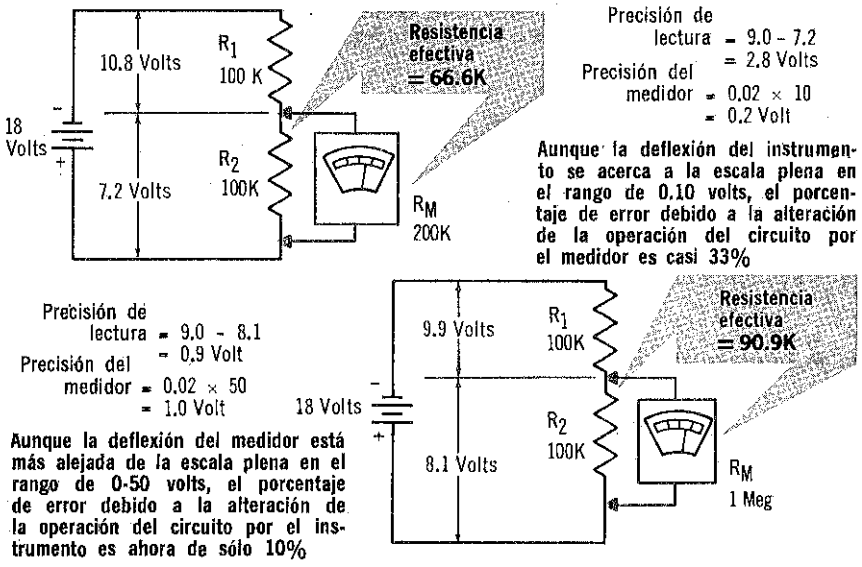


Para encontrar el voltaje en una componente, simplemente léase la escala del instrumento que corresponde a la posición del conmutador de rango: voltaje = 6 volts



lectura de la escala de un voltímetro

Como un voltímetro se conecta en paralelo con una componente, la resistencia del voltímetro debe ser lo más alta posible para evitar que se afecte la operación del circuito. Por lo tanto, cuando se usan medidores de pocos ohms/volt (de 20,000 ohms/volt o menores) en circuitos de alta resistencia, se usa el rango de medición *más alto* que se pueda leer con exactitud. Por ejemplo, para el circuito ilustrado, la tensión producida en las terminales del resistor de 100 K-ohm debe ser de 9 volts y, mediante la escala 0-50 volts de un medidor de 20,000 ohms/volt, se obtendrá una lectura más precisa que la que se obtendría mediante la escala de 0-10 volts.



Para un medidor de 20,000 ohms/volt con una precisión de ±2 por ciento en el rango de 0-10 volts, la resistencia efectiva de R_2 y la resistencia del medidor es 66.6 K-ohms. Por lo tanto, los voltajes que existen en R_2, indicado en el medidor, será $18 \times (66.6K/166.6K) = 7.2$ volts. Este registro es casi 2 volts más bajo que los 9 volts que resultarían si el medidor no estuviese conectado, aunque la precisión del medidor es ±0.2 volts en la escala de 0-10 volts.

En el caso de la escala de 0-50 volts, la resistencia efectiva de R_2 y la resistencia del medidor es 90.9 K-ohms. Por lo tanto, la tensión en R_2, la cual indica el medidor será $18 \times (90.9K/190.9K) = 8.1$ volts. Ahora este registro sólo es 1 volt más bajo que los 9 volts que se tendrían sin la inclusión del medidor y dentro de la precisión ±1 volt de la escala 0-50 volts. Por lo tanto, la escala 0-50 volts altera el funcionamiento del circuito mucho menos que la escala 0-10 volts y resultará una lectura más precisa.

resumen

☐ Debido a la relación de la ley de Ohm, una escala de medidor de corriente se puede calibrar en volts y utilizarse para medir tensión. ☐ Se agregan resistores multiplicadores en serie con la bobina para ampliar el rango de tensión del medidor. ☐ Para determinado rango de tensión, se puede obtener el valor necesario de la resistencia multiplicadora según $R_{MULT} = R_{TOT} - R_M$, donde $R_{TOT} = E_{MAX}/I_M$. ☐ Los voltímetros multirrango tienen varios resistores multiplicadores y un interruptor de rango.

☐ La sensibilidad de un voltímetro se expresa mediante su clasificación ohms/volt. Cuanto más alta sea esta clasificación, más sensible es el medidor. ☐ La clasificación ohms/volt de un voltímetro multirrango es la misma para todos los rangos. Sin embargo, la resistencia total del medidor aumenta en proporción directa con el rango. ☐ Los medidores con alta clasificación ohms/volt se deben usar para hacer mediciones en circuitos de alta impedancia. ☐ Para una medición precisa, la resistencia total del medidor en el rango usado, debe ser 10 o más veces mayor que la resistencia del circuito que se está probando.

☐ Los voltímetros deben conectarse en paralelo con la componente del circuito que se mide. La resistencia del voltímetro debe ser lo más alta posible para evitar que afecte la operación del circuito. ☐ Debe observarse la polaridad apropiada cuando se conectan voltímetros de c-c. Lo anterior no es necesario con voltímetros de c-c que tengan cero central o con voltímetros de c-a.

preguntas de repaso

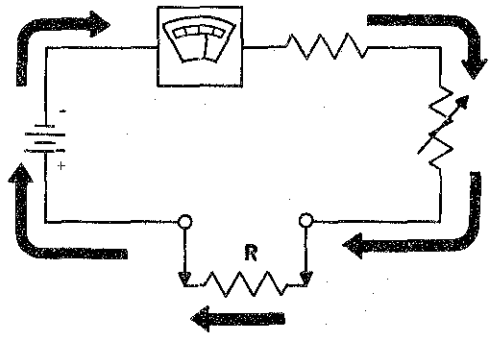
1. ¿Por qué pueden medir tensión los medidores de corriente?
2. ¿Por qué se usan resistores multiplicadores?
3. El medidor de 1 miliampere tiene una resistencia de bobina de 1,000 ohms. ¿Qué valor de resistor multiplicador se necesita para medir 100 volts?
4. La bobina y el resistor multiplicador de un medidor de 10 miliamperes tiene una resistencia total de 10K. ¿Cuál es la mayor tensión que se puede medir con este medidor?
5. ¿Qué significa *clasificación ohms/volt* de un voltímetro?
6. Si un medidor de 1 miliampere requiere una resistencia combinada de multiplicador y bobina de 5,000 ohms para una oscilación total de escala de 1 volt, ¿cuál es la clasificación ohms/volt de este medidor?
7. ¿Qué significa alta clasificación ohms/volt?
8. ¿Cuál es la relación entre la clasificación ohms/volt de un medidor y la corriente necesaria para la oscilación total de la escala?
9. ¿Cómo debe conectarse un voltímetro en un circuito?
10. ¿Por qué debe considerarse la resistencia total de un voltímetro cuando se hace una medición de tensión?

el ohmímetro

Un ohmímetro es un dispositivo que mide la resistencia de un circuito o de una componente. También sirve para localizar circuitos abiertos o corto circuitos.

Básicamente, un ohmímetro consta de un medidor de corriente continua, una fuente de baja tensión y baja potencia de c-c y resistores limitadores de corriente, todos ellos conectados en serie. El medidor de bobina móvil es el *único* aparato de medición de corriente que se usa en los ohmímetros. Como fuente de energía se usa una batería de baja tensión.

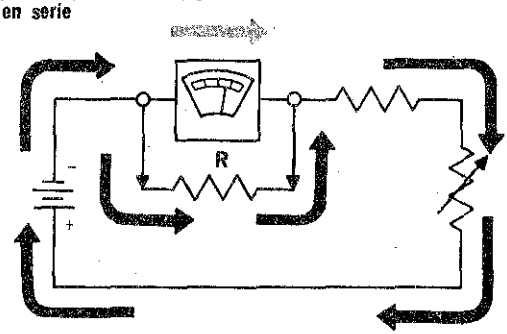
El ohmímetro en serie tiene la fuente de energía, medidor y resistencia limitadora de corriente, en serie



En un ohmímetro en serie, la resistencia por medir (R) está conectada en serie con el medidor

Existen dos tipos de ohmímetro: el ohmímetro en serie y el ohmímetro con derivador. En el ohmímetro en serie, la resistencia por medir se conecta *en serie con el medidor*. En el ohmímetro con derivador, la resistencia por medir se conecta *en paralelo con el medidor*. Según se explicará en seguida, cada uno de los dispositivos tiene ventajas distintivas para aplicaciones específicas.

El ohmímetro en derivación tiene también la fuente de potencia, el medidor, y el resistor limitador de corriente, en serie



En un ohmímetro en derivación la resistencia por medir (R) está conectada en paralelo con el medidor

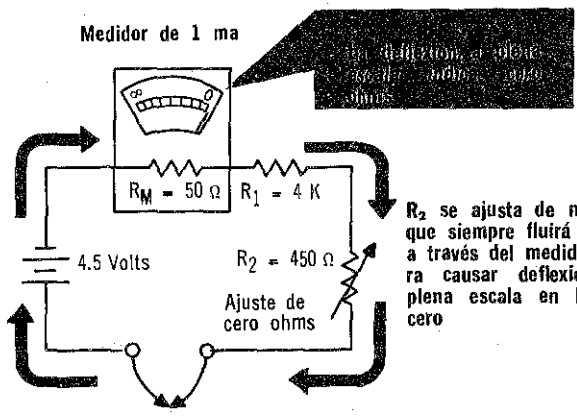
el ohmímetro en serie

En el ohmímetro en serie que se ilustra, se tiene un medidor de 1 miliampere, 50 ohms, conectado en serie con una batería de 4.5 volts, un resistor fijo de 4 K-ohm (R_1) y un resistor variable de 1 K-ohm (R_2). Si se conectan en corto las dos puntas de prueba, pasará corriente por el medidor y la aguja se moverá hacia la derecha. Para la oscilación completa debe pasar 1 miliampere a través del medidor. Para obtener un miliampere la resistencia en el circuito debe ser igual a 4.5 K-ohms. ($R = E/I = 4.5/0.001 = 4.5K$) Puesto que la resistencia del medidor es de 50 ohms y la resistencia de R_1 es 4 K-ohms, el valor de R_2 debe graduarse a 450 ohms para obtener 1 miliampere de corriente en el medidor y, por lo tanto, oscilación completa. Si la resistencia de R_2 es mayor que 450 ohms, se tendrá una corriente inferior a 1 miliampere y la aguja no oscilará totalmente. Si R_2 se hace inferior a 450 ohms, la corriente será superior a un miliampere y la aguja se moverá fuera de escala y golpeará el perno de retención de la derecha.

Nótese que conectar en corto las puntas de prueba significa que se tiene *resistencia cero* presente en las terminales de entrada del ohmímetro y cuando hay *resistencia cero*, la aguja oscila *toda la escala*. Por lo tanto, la oscilación de toda la escala de un ohmímetro en serie indica resistencia cero. Cabe preguntarse por qué un resistor fijo de 450 ohms no se usa en lugar del resistor variable que se ajusta a 450 ohms. La razón es sencilla: como ya se sabe, el voltaje de salida de las baterías va disminuyendo mientras pasa el tiempo. Al descender la tensión, la corriente en el circuito disminuye y el instrumento no oscilará totalmente. Pero, reduciendo el valor de R_2, se reduce la resistencia total del circuito y la corriente puede llevarse nuevamente al nivel de 1 miliampere que es el necesario para la oscilación completa. El resistor variable generalmente recibe el nombre de *control de ajuste de cero ohms.*

Cuando las terminales de entrada están en corto (resistencia cero), pasa 1 ma a través del mecanismo del medidor y la aguja se deflecta a plena escala

Con las terminales de entrada abierta (resistencia infinita), no hay paso de corriente en el medidor y la aguja no se mueve

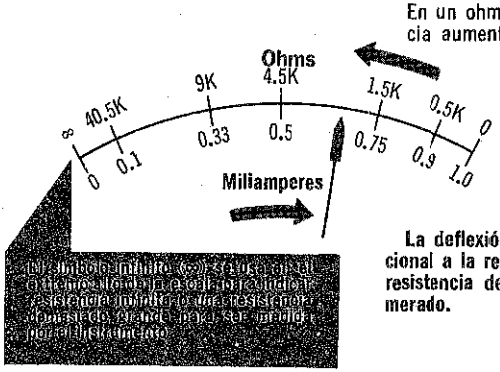


R_2 se ajusta de manera que siempre fluirá 1 ma a través del medidor para causar deflexión de plena escala en lectura cero

el ohmímetro en serie (cont.)

Si la aguja de un ohmímetro en serie oscila toda la escala con resistencia cero, ¿qué sucede cuando se conecta un resistor a las terminales de entrada? Supóngase que se conecta un resistor de 9 K-ohms en las terminales de entrada del ohmímetro que se ha descrito en la página anterior. Como este resistor tiene un valor de lo doble de la resistencia combinada de R_M, R_1 y R_2, la resistencia total del circuito es de 13.5 K-ohms. Por lo tanto, la corriente del medidor se reduce a ⅓ miliampere. Por lo tanto, una oscilación de la tercera parte de la escala indica una resistencia de 9 K-ohms en las terminales de entrada.

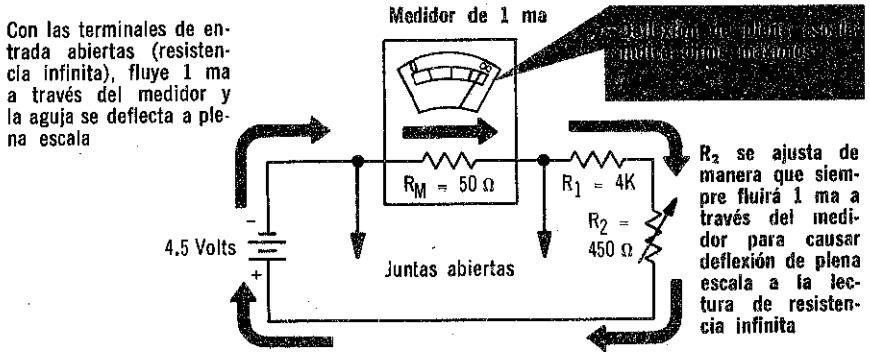
Si se conectan 4.5 K-ohms en las terminales del medidor la resistencia total del circuito cae a 9 K-ohms (lo doble de R_M, R_1 y R_2 combinada); la corriente del medidor aumenta a ½ miliampere y la aguja oscila media escala. Por lo tanto, una oscilación de media escala indica 4.5 K-ohms en las terminales de entrada.



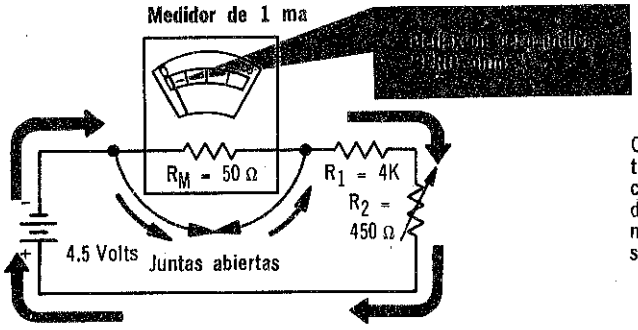
Si se conecta 1.5 K-ohms en las terminales del medidor la resistencia total del circuito desciende a 6 K-ohms, la corriente del medidor aumenta a 0.75 miliamperes y la aguja oscila tres cuartas partes de la escala completa. Si se continúa con resistores conocidos similares, se puede calibrar toda la escala. Se notará que el ohmímetro no tiene una escala lineal; o sea, la oscilación no aumenta en proporción directa a la resistencia que se mide. Por ejemplo, el resistor de 1.5 K-ohms producía una oscilación de tres cuartos de escala; el resistor de 4.5 K-ohms, tres veces el valor del anterior, causaba una oscilación de media escala; y el resistor de 9 K-ohms, seis veces el valor del resistor de 1.5 K-ohms, causaba una tercera parte de oscilación plena. Debido a la no linealidad, las lecturas de baja resistencia en el lado derecho de la escala están sumamente juntas entre sí en un ohmímetro en serie.

el ohmímetro con derivador

Es posible medir valores bajos de resistencia en un ohmímetro de derivador con mucha mayor precisión que en un ohmímetro en serie. En el ohmímetro tipo derivador la resistencia desconocida por medir se conecta en paralelo con el instrumento de movimiento rotatorio. Por lo tanto, parte de la corriente producida por la batería pasa a través del medidor y, otra parte, a través de la resistencia desconocida.



Supóngase que se tiene un ohmímetro de derivador con el mismo medidor básico que el ohmímetro en serie que se acaba de describir; o sea un medidor de 1 miliampere, 50 ohms. Nótese que se tiene un circuito completo de la terminal negativa de la batería, *a través del medidor* a través de R_1 y R_2 a la terminal positiva de la batería. Por lo tanto, pasará 1 miliampere a través del medidor y la aguja de éste siempre estará señalando escala plena en tanto no haya resistor conectado a las terminales de entrada. Ahora supóngase que se conectan en corto las terminales de entrada. Esto hace que toda la corriente del circuito corresponda a una oscilación total del instrumento y una corriente cero tiene como resultado una oscilación nula. Esto es exactamente lo opuesto del ohmímetro en serie, que oscila toda la escala cuando se conectan en corto las terminales de entrada del medidor.



el ohmímetro con derivador (cont.)

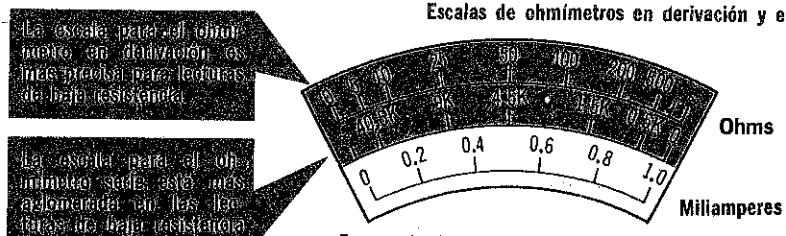
El ohmímetro con derivador se comporta como un medidor de corriente con un resistor derivado. La corriente se divide en relación inversamente proporcional a la resistencia del medidor y a la resistencia desconocida conectada en las terminales de entrada. Por ejemplo, para el medidor de 1 miliampere, 50 ohms que se ha descrito, suponga que se conecta una resistencia de 100 ohms a las terminales de entrada. Lo doble de la corriente (⅔ miliampere) pasará a través de la resistencia del medidor de 50 ohms, de la cual pasará a través del resistor de 100 ohms (⅓ miliampere). Como el medidor requiere 1 miliampere para oscilación completa, sólo oscilará las dos terceras partes de la escala con una corriente de ⅔ miliamperes.

Si se conectan 50 ohms a las terminales del medidor, la corriente en éste baja a ½ miliampere y la aguja oscila la mitad de la escala. Si se conectan 25 ohms a las terminales del medidor, la corriente de éste baja a ⅓ miliampere y la aguja oscila hasta una tercera parte de la escala. Como en el ohmímetro en serie, se puede continuar con resistores conocidos similares para calibrar toda la escala.

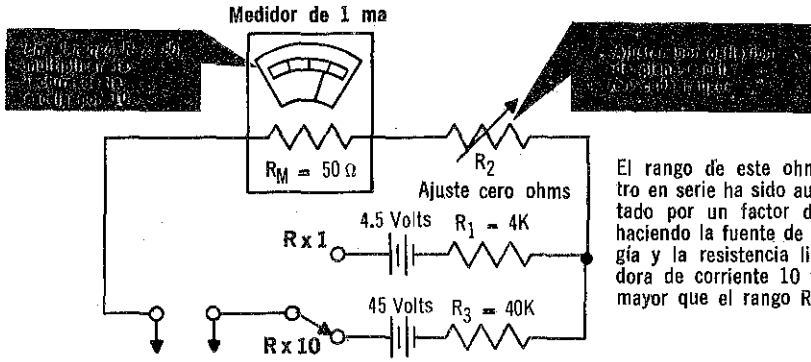
La variación de la resistencia del medidor con resistor desconocidos afecta a la resistencia serie del circuito del ohmímetro pero el efecto es tan ligero que puede hacerse caso omiso de él. La resistencia en paralelo del instrumento, que vale 50 ohms y el resistor desconocido siempre deben ser inferiores a 50 ohms. Como la resistencia en serie es 4,500 ohms, las variaciones en resistencia hasta de 50 ohms, son insignificantes.

El ohmímetro con derivador, como el ohmímetro en serie, no tiene una escala lineal. Por ejemplo, el resistor de 100 ohms causa una oscilación de dos tercios de la escala; el resistor de 50 ohms, o sea la mitad de 100 ohms, causa una oscilación de media escala; y el resistor de 25 ohms, o sea la cuarta parte de 10 ohms, causa una oscilación hasta la tercera parte de la escala. Debido a la linealidad, las lecturas de alta resistencia en el extremo derecho de la escala quedan muy juntas entre sí. Sin embargo, para el mismo medidor, las lecturas de baja resistencia del ohmímetro derivado están menos aglomeradas que las de un ohmímetro en serie, lo cual tiene como resultado lecturas más precisas de valores bajos de resistencia.

Escalas de ohmímetros en derivación y en serie



En un ohmímetro en derivación el valor de la resistencia aumenta de izquierda a derecha.



El rango de este ohmímetro en serie ha sido aumentado por un factor de 10 haciendo la fuente de energía y la resistencia limitadora de corriente 10 veces mayor que el rango R × 1

ohmímetros en serie de alcance múltiple

Se ha advertido que suele ser poco práctico emplear medidores de corriente así como voltímetros de rango único cuando se trabaja con equipo eléctrico. Lo mismo ocurre con los ohmímetros; los ohmímetros de alcance múltiple son más prácticos. El rango del ohmímetro en serie no se puede ampliar hasta leer resistencias más altas, simplemente agregando resistores en serie o en paralelo con el medidor, como ocurre con los medidores de corriente y voltímetros. La única forma en que se puede ampliar el rango es aumentar la tensión de la fuente de potencia. Como la corriente que pasa a través del circuito del ohmímetro y el resistor desconocido siguen la ley de Ohm ($I = E/R$), al aumentar la resistencia desconocida se llegará hasta un punto donde prácticamente no habrá flujo de corriente y el medidor no se moverá. Por lo tanto, para tener oscilaciones notables, se necesita mayor voltaje para obtener una corriente mensurable en el circuito.

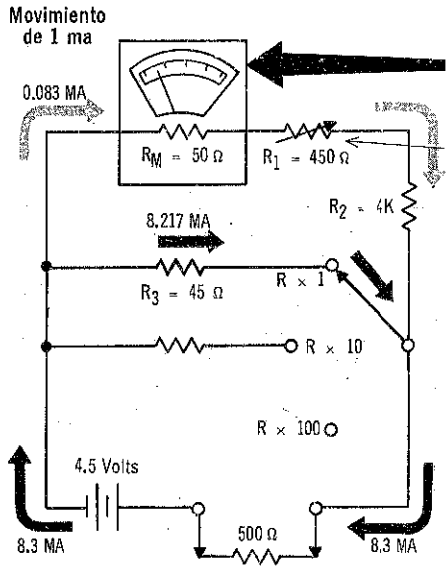
Por ejemplo, si la tensión de alimentación se aumenta por un factor de diez, a 45 volts, la resistencia desconocida que se puede medir aumenta por un factor de diez. Sin embargo, el resistor limitador de corriente R_3 debe ser diez veces mayor que R_1. En esta disposición, pues, se tiene un ohmímetro que mide resistencia en dos rangos: *R × 1* rango del ohmímetro en serie básico y *R × 10*, rango para lecturas diez veces mayores que las indicadas. El rango de un ohmímetro generalmente se amplía por múltiplos de diez, y el interruptor de rango está marcado *R × 1*, *R × 10*, *R × 100*, etc.

Sería poco práctico ampliar el rango del ohmímetro en serie de 1 miliampere por un factor mayor de diez, debido a que se requeriría una tensión de alimentación muy alta. Para el rango R × 10, la fuente de potencia tendría que ser de 450 volts, lo cual resulta poco práctico. Por lo tanto, para ohmímetros en serie de alcance múltiple, se usan medidores más sensibles, por ejemplo de 20,000 ohms/volt. Este medidor requeriría sólo 50 microamperes para oscilación completa, por lo tanto, se puede usar una fuente de tensión mucho más pequeña.

ohmímetros en serie de alcance múltiple (cont.)

Ya se explicó cómo se amplía el rango de un ohmímetro básico en serie para leer resistencias más altas. El mismo ohmímetro básico se puede modificar para medir resistencias menores, conectando resistores derivados al medidor y a sus resistores limitadores de corriente, R_1 y R_2. No debe confundirse esto con el ohmímetro con derivador; el resistor desconocido continúa *en serie* con el medidor.

El ohmímetro básico que se ha analizado tenía un rango útil de 0-50 K-ohms. Se modificará ahora para incluir rangos de 0-500 y 0-5,000 ohms. Aunque se pueden dar escalas separadas para cada rango, los ohmímetros generalmente están *calibrados* para el *rango más bajo* y los *factores multiplicadores* (R × 10, R × 100, R × 1,000) se usan para los *rangos más altos*. Por lo tanto, el rango *más bajo* en este caso será 0-500 ohms, y la oscilación de la aguja debe reducirse por un factor de 100 del rango básico de 0-50 K-ohm. Esto se logra conectando un resistor en derivación a la resistencia del circuito del medidor ($R_M + R_1 + R_2$). Para reducir la oscilación por un factor de 100, la resistencia en derivación debe ser 1/100 del valor del circuito del medidor, de manera que se tenga 1/100 de la corriente a través del medidor. Como la resistencia del circuito del medidor es igual a 4,500 ohms, debe usarse un resistor en derivación de 45 ohms en la escala de 0-500 ohms, lo cual reduce la resistencia de circuito del medidor a unos 45 ohms.

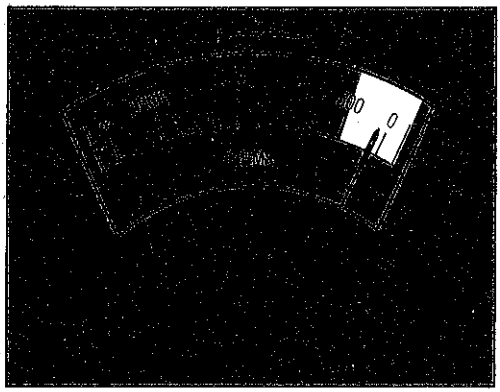


debido a que la resistencia del circuito de instrumento total es de 4.5 K y está derivada por un resistor de 45 ohms, sólo fluirá 1/100 de la corriente a través del medidor y la aguja se deflecta 1/100 de la escala plena

Ajuste de cero ohms

Se pueden medir resistencias en rangos más bajos, con un ohmímetro en serie, empleando derivadores

ESCALA SIN DERIVADOR DE INSTRUMENTO



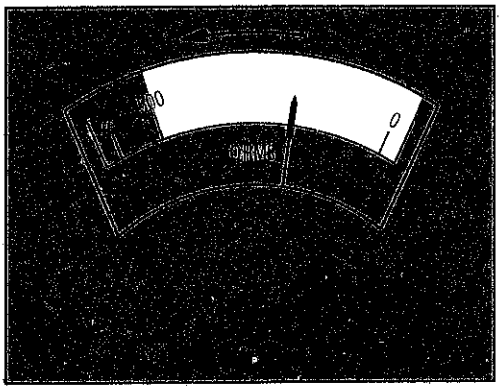
Las lecturas de baja resistencia en un ohmímetro en serie están aglomeradas sin usar un derivador de instrumento

ohmímetros en serie de alcance múltiple (cont.)

Ahora, cuando se mide un resistor de 500 ohms, la resistencia total del circuito es de 545 ohms y la corriente total del circuito se hace de 8.3 miliamperes ($I = E/R = 4.5/545 = 8.3$ miliamperes). Como la corriente del medidor será de 1/100 de la corriente total, se tendrá 0.083 miliamperes a través de la bobina móvil del medidor, la cual tiene como resultado un 0.083 de la oscilación completa (1 miliampere es igual a la oscilación completa). En el ohmímetro en serie básico sin derivaciones, la escala registraba de 0 a 50 KΩ, y las lecturas de 0 a 500 ohms estaban *muy juntas entre sí.* Ahora bien, con el uso de un derivador, las lecturas de rango bajo del ohmímetro en serie están *ampliadas* de manera que se pueden leer con mucha mayor precisión valores entre 0 y 500 ohms.

ESCALA CON DERIVADOR DE INSTRUMENTO

La lectura de baja resistencia en un ohmímetro en serie, se encuentra extendida por el uso de un derivador de instrumento

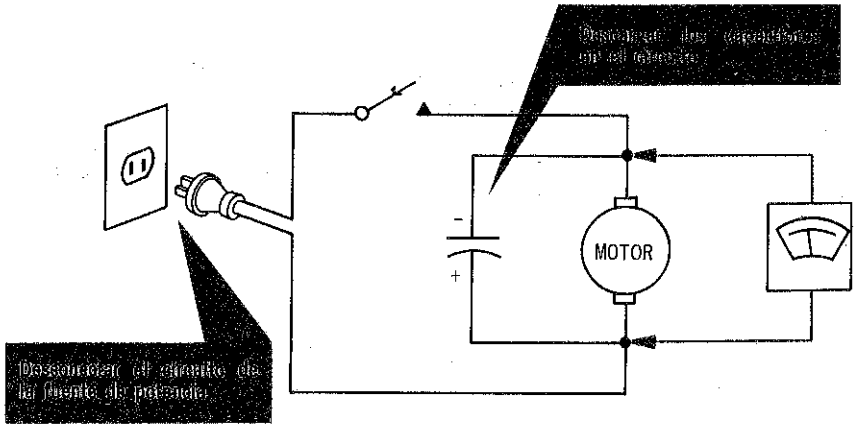


usos del ohmímetro

Un ohmímetro no sólo puede medir la resistencia de varias partes de un circuito, sino que puede usarse para comprobar partes abiertas o en corto de un circuito y para establecer la continuidad de un circuito. En todo caso, sin embargo, para evitar dañar el ohmímetro, hay que asegurarse que no se conecta la fuente de tensión a las puntas del ohmímetro cuando se hace una medición. Las lecturas de resistencia sólo se hacen en circuitos no energizados. Si el circuito estuviese energizado, su tensión podría favorecer el paso de una corriente que dañará al medidor.

El simple cambio de un interruptor a la posición de abierto no siempre evita que el ohmímetro quede conectado a una fuente de tensión. Algunas veces, el interruptor mismo puede estar defectuoso y habrá tensión en el equipo. O bien, si se debe comprobar el estado del propio interruptor, se puede aplicar una tensión a las puntas del ohmímetro aún con el interruptor abierto.

Para proteger un ohmímetro



Por lo tanto, la forma más segura de proteger un ohmímetro es desconectar el equipo de la fuente de potencia siempre que sea posible. Aun con el equipo desconectado de la fuente de potencia, el ohmímetro no está completamente protegido de las tensiones del circuito. Esto sólo evita la posibilidad de conectar el ohmímetro a una tensión producida por una fuente de potencia, batería u otra fuente ordinaria de tensión. No obstante, todavía podría estar conectado a un capacitor cargado, que proporcionaría suficiente corriente para dañar gravemente al ohmímetro. Por lo tanto, para proteger al ohmímetro no debe desconectarse el equipo de la fuente de potencia, sino que también deben descargarse cualesquiera de los capacitores, especialmente de los tipos electrolíticos, que haya en el circuito que se mide.

usos del ohmímetro (cont.)

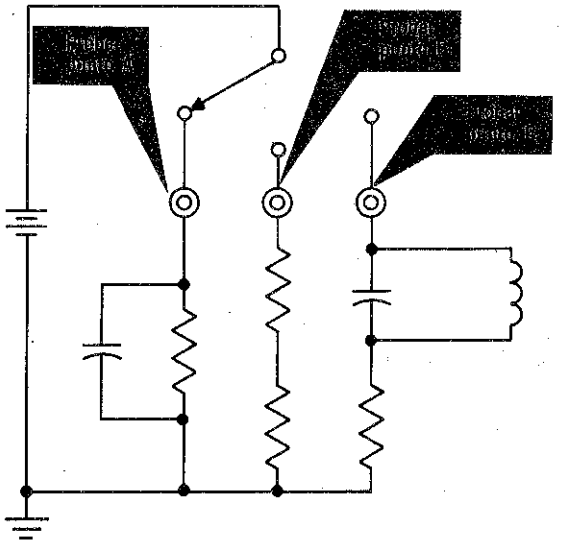
Cuando se hacen mediciones de resistencia en circuitos, puede probarse individualmente cada una de las partes, retirándolas del circuito y conectando las puntas del ohmímetro a las terminales. En realidad, la parte no tiene que estar completamente retirada del circuito. En la mayor parte de los casos, puede aislarse efectivamente el circuito abriendo sólo una de sus conexiones al circuito. Sin embargo, este método, tarda tiempo. Por lo tanto, los fabricantes de muchos equipos proporcionan gráficas que señalan las resistencias que deben medirse desde varios *puntos de prueba* a un *punto de referencia* en el equipo. Generalmente se tienen muchas partes de circuito entre el punto de prueba y la referencia o punto común. Por otra parte, cuando se obtiene una lectura anormal, debe iniciarse la comprobación de grupos de piezas más pequeños hasta llegar a piezas particulares en el circuito, para aislar la que esté defectuosa.

Los fabricantes frecuentemente suministran gráficas para simplificar las mediciones de resistencia

Carta de resistencia

PUNTO DE PRUEBA	RESISTENCIA A TIERRA
A	20K
B	30K
C	200K

Para esta carta, se encuentra indicada la resistencia que ha de medirse con respecto a tierra para cada posición del conmutador

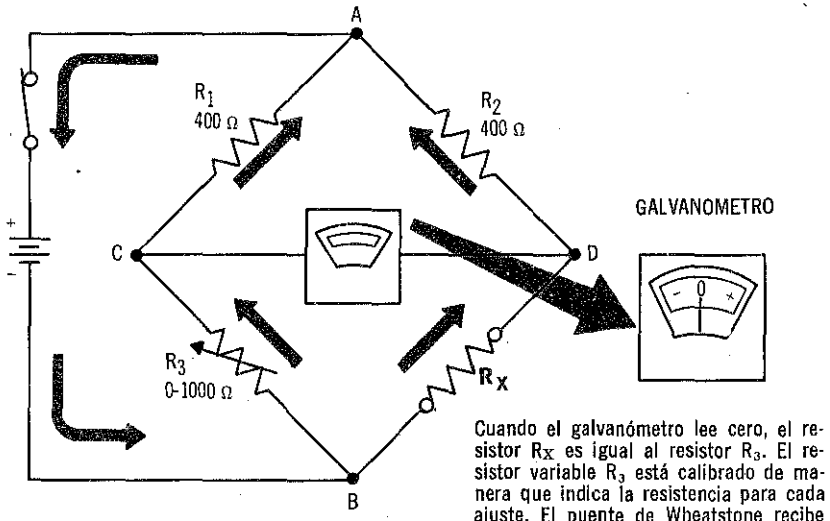


Si no se dispone de resistencia se debe tener cuidado de que todas las demás piezas del circuito no están conectadas en paralelo con la que se prueba. Esto se puede comprobar examinando el diagrama esquemático y de alambrado para el equipo particular. Si otras piezas están en paralelo con la que se está midiendo, se puede aislar esa pieza abriendo una (o más si es necesario) de sus conexiones al circuito.

puente de wheatstone

Cuando se requieren mediciones de resistencia muy precisas, se usa un puente de Wheatstone. Un puente de Wheatstone consta de cuatro resistores conectados en un dispositivo cuadrangular. Uno de los resistores tiene el valor desconocido, el cual se desea medir. Una fuente de corriente se conecta a dos uniones opuestas y un galvanómetro sensible entre las otras dos. El galvanómetro tiene la marca de cero al centro.

Puente básico de Wheatstone



Cuando el galvanómetro lee cero, el resistor R_X es igual al resistor R_3. El resistor variable R_3 está calibrado de manera que indica la resistencia para cada ajuste. El puente de Wheatstone recibe su nombre en honor de su inventor, Sir Charles Wheatstone

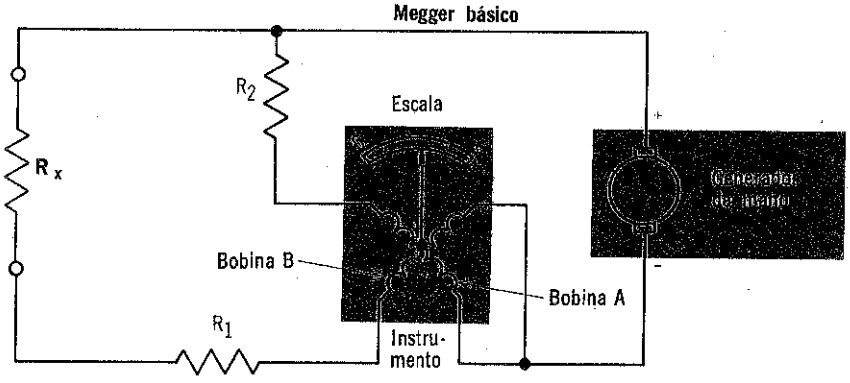
Para comprender cómo un puente de Wheatstone mide la resistencia, supóngase que los resistores tanto R_1 como R_2 tienen 400 ohms, y el resistor R_3 varía entre 0 y 1,000 ohms. Ahora conéctese el resistor desconocido R_X al circuito de puente y ciérrese el interruptor. Se puede ver que R_1 y R_3 forman un circuito divisor y R_2 con R_X forman otro circuito divisor. Por lo tanto, como R_1 es igual a R_2 si R_3 se hace igual a R_X, la corriente y las caídas de potencial en ambos divisores serán idénticas. Además, los potenciales en los puntos C y D serán iguales, de manera que no pasará corriente a través del medidor. Por lo tanto, cuando se ajusta R_3 para una lectura cero, se sabe que su valor es igual a R_X. El resistor variable R_3 se calibra para que indique su resistencia exacta cuando se ajusta. Por lo tanto, su ajuste también es el valor de la resistencia desconocida R_X. Cuando se usa una fuente de c-a y el puente contiene capacitores o inductores, sirve para medir capacitancia e inductancia, en la misma forma.

megohmímetro

Otro dispositivo que se emplea muy comúnmente para medir resistencias es el *megohmímetro,* llamado también *megger* o *megohmer.* El megohmímetro mide resistencias muy altas, como las que hay en el aislamiento de cables, entre devanados de motores o transformadores, etc. Estas resistencias generalmente varían de varios cientos a varios miles de megohms, y son demasiado altas de modo que no pueden ser medidas por un ohmímetro o puente de Wheatstone.

Básicamente un megohmímetro consiste en una manivela, un generador en una caja de engranes y un medidor. Cuando se gira la manivela, los engranes hacen girar al generador a alta velocidad, de manera que genere una tensión de 100, 500, 1,000, 2,500 ó 5,000 volts, según el tipo de megohmímetro que se emplee.

El megohmímetro es similar al medidor de bobina móvil que se ha examinado, excepto porque tiene dos devanados. Un devanado (A) está en serie con el resistor R_2 en la salida del generador. Este devanado está hecho de tal manera que hace moverse la aguja hacia el extremo de alta resistencia de la escala cuando el generador está funcionando. El otro devanado (B) está en serie con el resistor R_1 y la resistencia desconocida (R_X) por medir. Este devanado está hecho de tal manera que hace moverse la aguja hacia el extremo de la escala que indica baja resistencia, o resistencia cero, cuando el generador está funcionando.



Los meggers pueden medir resistencias que varían desde cientos a miles de megohms

Cuando se tiene una resistencia muy alta en las terminales de entrada del megohmímetro como en un circuito abierto o que está por abrirse, la corriente en la bobina A hace que la aguja registre infinito. Por otra parte, cuando hay una resistencia relativamente baja en las terminales de entrada, la corriente en la bobina B hace que la aguja oscile hacia cero. La aguja se detiene en un punto de la escala, determinado por la corriente en la bobina B, que está regida por R_X.

resumen

☐ Un ohmímetro sirve para medir resistencia. Consta de un medidor de corriente continua, una fuente de potencia de baja tensión y resistores limitadores de corriente. ☐ En un ohmímetro en serie, la resistencia por medir se conecta en serie con el medidor. ☐ Cuando hay cero resistencia entre las terminales de entrada de un ohmímetro en serie, la aguja oscila totalmente. Cuanto mayor sea la resistencia entre las terminales, menos girará la aguja. ☐ La escala de un ohmímetro en serie no es lineal, y los valores de resistencias se aglomeran cada vez más en el extremo izquierdo de la escala.

☐ En un ohmímetro con derivador, la resistencia por medir se conecta en paralelo con el medidor. Este aparato funciona como un medidor de corriente con un resistor en derivación. ☐ En el ohmímetro con derivador, cuanto mayor sea la resistencia por medir, oscilará más la aguja. ☐ Los ohmímetros con derivador tienen escalas no lineales, aunque no tan lineales en el extremo de baja resistencia de la escala, como los ohmímetros en serie. ☐ Un ohmímetro de alcance múltiple tiene un valor diferente de voltaje, de fuente para cada rango. ☐ Después de determinado rango, resulta poco práctico aumentar más la tensión. Para estos rangos, por lo tanto, deben usarse medidores más sensibles. ☐ Para medir resistencias muy bajas, se usan resistores en derivación en el medidor y los resistores limitadores de corriente.

☐ Antes de usar un ohmímetro el circuito que es objeto de la prueba debe de energizarse y descargar todos los capacitores grandes. ☐ Se emplea un puente de Wheatstone para hacer mediciones de resistencia muy precisas. Consta de una fuente de corriente, un galvanómetro y cuatro resistencias, una de ellas desconocida, conectadas en disposición cuadrangular. ☐ Un megohmímetro sirve para medir resistencias muy altas, generalmente de varios cientos a varios miles de megohms.

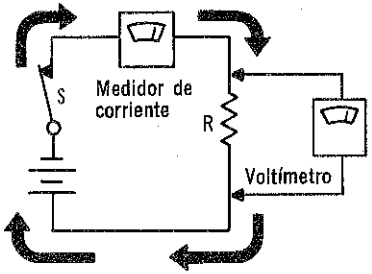
preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son las partes básicas de un ohmímetro?
2. ¿Cuál es la diferencia básica entre el ohmímetro en serie y el que tiene derivador?
3. Dibuje los circuitos de dos ohmímetros simples, uno en serie y otro con derivador.
4. ¿Qué tipo de ohmímetro oscila totalmente cuando mide resistencia cero?
5. ¿Cuál es el objeto de controlar el ajuste en cero ohms?
6. ¿De qué manera se extiende el rango en ohmímetros en serie con alcance múltiple?
7. ¿Por qué debe de desenergizarse un circuito antes de hacer mediciones de resistencia en él?
8. ¿Para qué sirven los puentes de Wheatstone?
9. Dibuje un diagrama esquemático de un puente de Wheatstone simple.
10. ¿Qué es un *megohmímetro*?

cálculo de la potencia

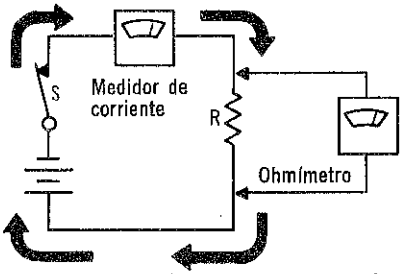
Si se desea determinar la potencia disipada en una carga eléctrica, se pueden medir dos cualesquiera de las tres magnitudes eléctricas básicas estudiadas: *corriente, tensión y resistencia.* Por ejemplo, téngase presente que la potencia se calcula multiplicando voltaje por corriente: $P = EI$. Por lo tanto, si se usa un voltímetro para medir el voltaje de una carga y un medidor de corriente para medir la corriente que pasa a través de la carga, se incluyen estos valores en la ecuación de potencia. En forma similar, la corriente en la carga y su resistencia se miden calculando el valor de la potencia según $P = I^2R$. O bien, se mide el voltaje que hay en la carga y su resistencia y luego se calcula la potencia según $P = E^2/R$.

Voltaje de corriente conocido



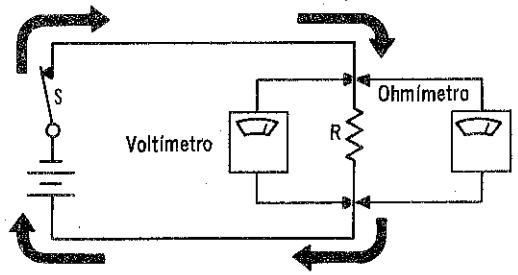
La potencia disipada por R se puede encontrar midiendo la corriente y el voltaje e insertando en: $P = EI$

Corriente y resistencia conocidas



La potencia disipada por R se puede encontrar midiendo primero la corriente con el interruptor cerrado y luego la resistencia de R con el interruptor abierto, y sustituyendo en: $P = I^2R$

Voltaje y resistencia conocidos



La potencia disipada por R se puede encontrar midiendo primeramente el voltaje en R con el interruptor cerrado y luego la resistencia de R con el interruptor abierto y sustituyendo en: $P = E^2/R$

Sin embargo, en la práctica no suele ser necesario medir dos cantidades. Por lo común se conoce una y a veces dos. Por ejemplo, generalmente se sabe cuánto voltaje se aplica a la carga; por lo tanto, es suficiente medir la resistencia o la corriente. En otros casos, se conocen tanto el voltaje de la carga como su resistencia; en este caso, no es necesario efectuar mediciones, pudiéndose calcular la potencia según $P = E^2/R$.

watímetro

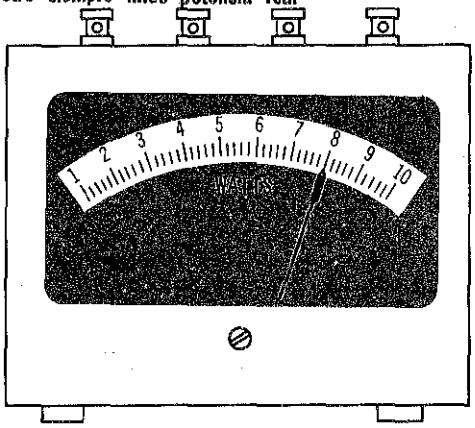
En lugar de efectuar una o dos mediciones y luego calcular la potencia, se puede conectar un medidor para medir la potencia, llamado *watímetro*. La potencia disipada se puede leer directamente de la escala de este medidor. El watímetro no sólo simplifica las mediciones de potencia, sino que tiene otras dos ventajas sobre el método anterior de medición de potencia.

En el volumen 3, se ha explicado que, a menudo, el voltaje y la corriente de un circuito de c-a no están en fase; a veces, la corriente está adelantada o atrasada con respecto al voltaje (factor de potencia). Ya se ha visto que cuando esto ocurre, la simple multiplicación de voltaje por corriente da como resultado *potencia aparente* y no *potencia real*. Por lo tanto, en un circuito de c-a, la medición de voltaje y corriente y la multiplicación posterior de una por la otra produce a menudo un valor incorrecto de disipación de potencia. Sin embargo, el watímetro se hace de modo que queda incluido el factor de potencia del circuito y siempre indica potencia real.

Un watímetro siempre mide potencia real

Algunos watímetros están compensados por su propia disipación de potencia de manera que se pueden obtener mediciones de potencia muy precisas

Si un watímetro no está compensado, su disipación de potencia se puede determinar fácilmente, lo que resulta en mediciones de potencia precisas



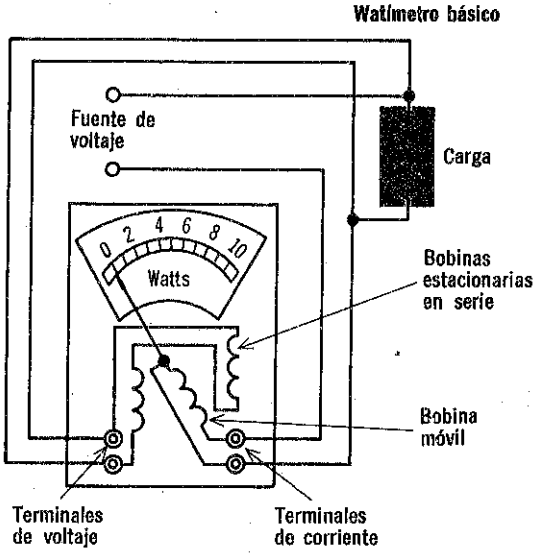
Los voltímetros y los medidores de corriente consumen potencia por sí mismos. La cantidad de potencia consumida depende de los niveles de voltaje y corriente del circuito y no pueden preverse con precisión. Por lo tanto, no se pueden efectuar mediciones muy precisas de potencia, midiendo voltaje y corriente y luego calculando la potencia. Sin embargo, algunos watímetros están compensados por sus propias pérdidas de potencia, de manera que sólo miden la potencia disipada en el circuito. Si el watímetro no está compensado, la potencia disipada algunas veces está marcada en el medidor o bien se puede determinar fácilmente de manera que se puede obtener una lectura muy precisa. Típicamente, la precisión de un watímetro está dentro del 1 por ciento.

el watímetro básico

Un watímetro básico está provisto de dos bobinas estacionarias conectadas en serie, y una bobina móvil. Las bobinas estacionarias, devanadas en muchas espiras de alambre delgado, tienen una alta resistencia. La bobina móvil, con unas cuantas espiras de un alambre más grueso, tiene baja resistencia. Para medir potencia, las bobinas estacionarias se conectan a la tensión de la fuente, que determina la corriente en estas bobinas y, por lo tanto, la intensidad de los campos magnéticos que produzcan. La bobina móvil se conecta en serie con la carga y la corriente de la carga origina un campo magnético relacionado con la bobina móvil.

La interacción de los dos campos magnéticos hará que la bobina móvil y la aguja conectada a ella oscilen en proporción al voltaje de la carga y a la corriente que pasa por ella. Por lo tanto, el medidor indica E multiplicado por I, que es la disipación de potencia.

Cuando se usa un watímetro, no debe excederse su capacidad de tensión y corriente. Debe tenerse cuidado al interpretar estas clasificaciones. Por ejemplo, un watímetro con un registro total de escala de 500 watts, puede estar clasificado a 150 volts y 5 amperes (150 volts × 5 amperes = 750 watts). Si el watímetro se conecta a un circuito con 150 volts y 5 amperes y el circuito tiene un factor de potencia de aproximadamente 1.0, entonces la aguja del medidor se saldrá hacia la derecha de la escala y puede doblarse sobre el perno de retención correspondiente. La mayor parte de los watímetros están clasificados de esta manera debido a que los circuitos de c-a generalmente tienen un factor de potencia inferior a 1.0 y, por lo tanto, la potencia medida será menor que E × I.



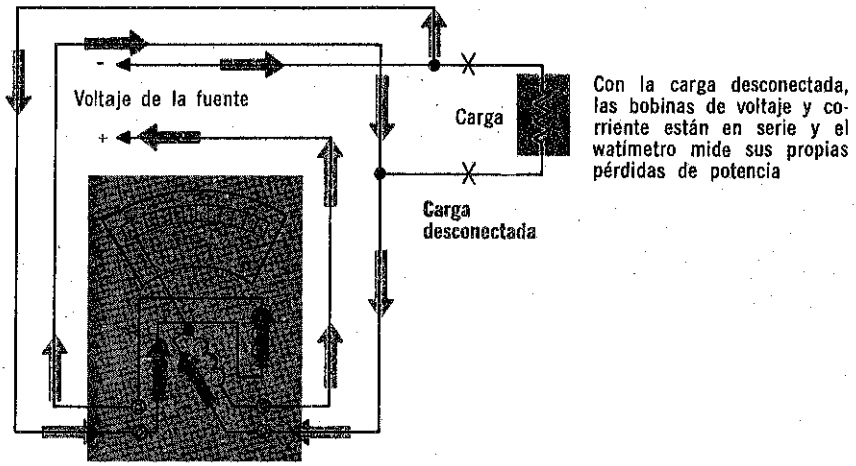
Aplicando el voltaje en la carga a la bobina estacionaria y la corriente a través de la carga a la bobina móvil, la deflexión de la aguja del voltímetro es proporcional al voltaje de la corriente.

Por lo tanto, puesto que la potencia es proporcional al voltaje y a la corriente, la potencia disipada en la carga se puede leer directamente de la escala del watímetro

comprobación de pérdidas de potencia del watímetro

Tanto las bobinas estacionarias (voltaje) como la móvil (corriente) del watímetro tienen resistencia, lo que produce cierta pérdida de potencia en el circuito debida al watímetro. A menos que esta pérdida de potencia sea considerada, se harán lecturas incorrectas de la potencia.

Algunos watímetros están compensados; es decir, la pérdida de potencia ha sido compensada, de manera que puede pasarse por alto al usar el medidor. Muchos watímetros no compensados tienen indicadas sus pérdidas de potencia en el propio medidor o en los datos que proporcione el fabricante. Cuando se usa un watímetro de este tipo, la pérdida de potencia indicada en el medidor o en los datos del fabricante, deben *restarse* de la lectura de escala del watímetro para obtener la potencia real disipada por la carga.



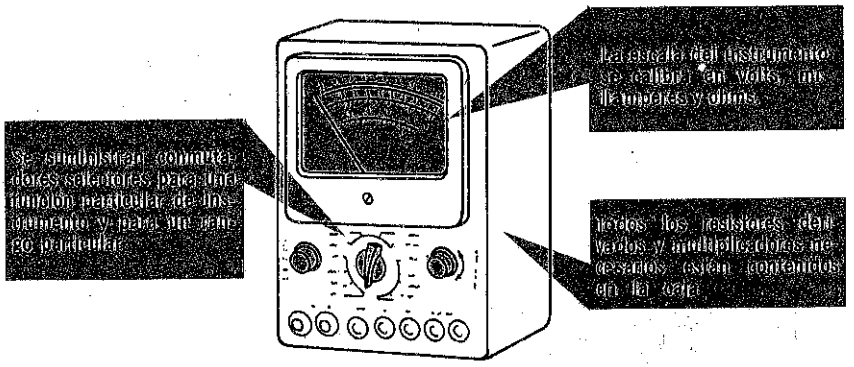
Otros watímetros no compensados no tienen indicadas sus pérdidas en el medidor ni en los datos del fabricante. En este caso, debe determinarse la pérdida de potencia simplemente desconectando la carga del circuito pero dejando conectado el watímetro. Cuando la carga está desconectada, la bobina estacionaria (la de voltaje) está en serie con la bobina móvil (la de corriente) y la corriente que proviene de la fuente pasa por ambas bobinas. En cierto sentido, la resistencia de la bobina a la c-c se convierte en carga; esta resistencia es la que causa la pérdida de potencia, por lo tanto, el watímetro registrará sus propias pérdidas.

Este método es útil para comprobar la precisión de un watímetro compensado o la pérdida de potencia indicada en el medidor, o en los datos proporcionados por el fabricante. En el caso de medidores compensados con precisión, el medidor indica cero. Para clasificaciones precisas y datos de fabricante, el medidor registra las pérdidas de potencia de clasificación o de los datos.

el multímetro básico

Probablemente las tres magnitudes eléctricas que más frecuentemente se miden son la corriente, el voltaje y la resistencia. Ya se ha estudiado que se puede leer la corriente en un medidor de corriente, el voltaje en un voltímetro y la resistencia en un ohmímetro. Pero en la mayor parte de los casos, es impráctico y a veces casi imposible, que el ingeniero o el técnico, lleven consigo todos los aparatos necesarios para medir estas tres magnitudes. Por ejemplo, sería difícil que un ingeniero de campo o un técnico de campo, carguen tres medidores, además de todas las otras herramientas y refacciones que pudiera necesitar. Existen otros muchos casos en que sería impráctico usar medidores de corriente, voltímetros y ohmímetros separados. Para resolver este problema se creó el multímetro.

Este multímetro completamente autocontenido mide voltaje, corriente y resistencia



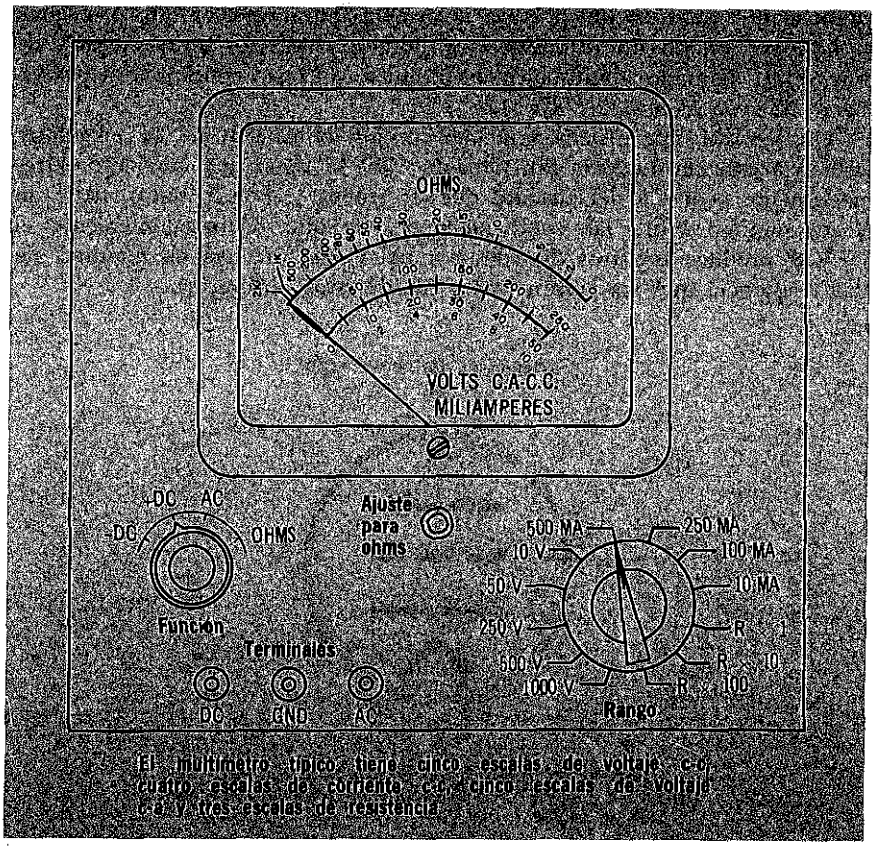
El multímetro es probablemente el elemento de equipo de prueba que se usa con mayor frecuencia en las industrias eléctrica y electrónica

Básicamente, un multímetro consta de un voltímetro, un ohmímetro y un medidor de corriente contenidos en una caja. Los circuitos de este medidor son casi idénticos a los que se han estudiado anteriormente en este mismo texto. Sin embargo, un multímetro dispone de un solo mecanismo de medidor con una escala calibrada en volts, ohms y miliamperes. Los resistores multiplicadores necesarios y todos los resistores en derivación están dentro de la caja. Cuenta con interruptores selectores frontales, para seleccionar una función particular del medidor y un rango especial para esa función.

Algunos multímetros están provistos de dos interruptores para seleccionar una función y un rango; otros multímetros, sólo tienen un interruptor. Algunos multímetros carecen de interruptores para este uso. En cambio, tienen terminales diferentes para cada función y rango.

escalas y rangos

Los circuitos de voltaje, corriente y resistencia de un multímetro son esencialmente los mismos que se han estudiado anteriormente en este libro. Un multímetro es básicamente un voltímetro de alcance múltiple, un medidor de corriente de alcance múltiple y un ohmímetro de alcance múltiple combinados en una sola caja. Los circuitos de interruptores o las diferentes terminales tienen por objeto seleccionar la función y el rango más adecuados.



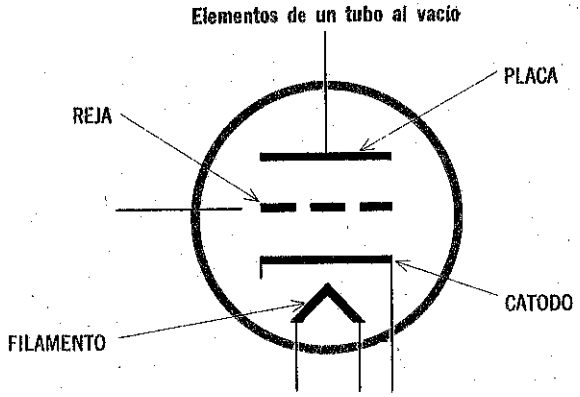
El multímetro típico tiene cinco escalas de voltaje c-c, cuatro escalas de corriente c-c, cinco escalas de voltaje c-a y tres escalas de resistencia.

La mayor parte de los multímetros tienen tres escalas: una calibrada en resistencia, otra en voltaje y otra más en corriente. Un multímetro típico puede tener dos interruptores selectores: uno para ajustar los circuitos de manera que midan ya sea corriente continua o voltaje de c-c, corriente o voltaje alternos o resistencia; el otro para seleccionar el rango de la magnitud a medir. Algunas veces se usa sólo un interruptor para seleccionar función y rango y, en otros casos, se tienen terminales especiales para el objeto.

el voltímetro básico de tubo al vacío

Se sabe que cuanto mayor sea la clasificación ohms/volt de un voltímetro, menos afectará el voltímetro las condiciones del circuito. Y cuanto menos se alteren las condiciones de un circuito, más precisa será la lectura que se obtenga. La mayor parte de los mejores voltímetros y multímetros que pueden obtenerse actualmente en el mercado, tiene aproximadamente 20,000 ohms/volt. Sin embargo, en algunos de los circuitos de muy alta resistencia que hay en ciertos circuitos actuales, aun un medidor de 20,000 ohms/volts altera considerablemente las condiciones del circuito, lo que produce una lectura incorrecta. Para resolver este problema, se ha desarrollado un dispositivo con una clasificación muy elevada de ohms/volt, llamado multímetro electrónico o, más comúnmente, *voltímetro de tubo al vacío* (VTVM).

Un VTVM típico tiene una clasificación ohms/volt de 11 megohms. Debido a esta clasificación tan alta, un VTVM toma una corriente extremadamente pequeña del circuito que se prueba y, por lo tanto, tiene un efecto mínimo sobre las condiciones del circuito. Consecuentemente el VTVM produce registros de voltaje mucho más precisos en circuitos de alta resistencia que los voltímetros y multímetros ordinarios.

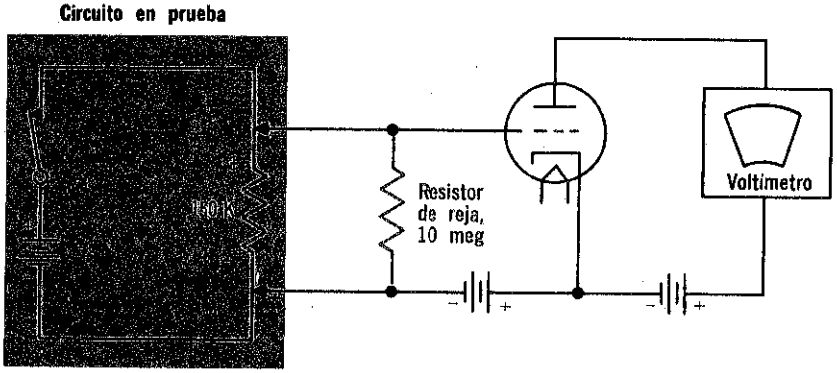


El tubo al vacío consta de tres elementos básicos: placa, reja y cátodo. Además, tiene un filamento para calentar el cátodo

Como lo implica su nombre, el VTVM tiene tubos al vacío para su operación y, para comprenderla, es necesario conocer estos tubos. Como no se han estudiado los tubos al vacío, sólo se examinarán sus principios. El VTVM más común es el del tipo de c-c. Aun cuando se trata de un VTVM de c-c, mide también voltaje y resistencia de c-a. El circuito de entrada de un VTVM básico tiene un *tubo triodo amplificador al vacío,* que tiene tres elementos principales: *placa, reja* y *cátodo*. Además, contiene un *filamento* para calentar el cátodo.

el voltímetro básico de tubo al vacío (cont.)

Cuando se calienta el cátodo de un tubo al vacío triodo amplificado, emite electrones que son atraídos hacia la placa debido a que ésta está conectada a una fuente positiva de voltaje. El voltaje en la reja, que se determina por el resistor de reja, controla el número de electrones, o sea la corriente que fluye en el tubo hacia la placa. Nótese que se tiene un medidor de corriente continua, calibrado en volts, conectado a la placa. Cuando sólo el resistor de reja está conectado al circuito de reja, habrá cierto voltaje en la reja y, por lo tanto, pasará cierta corriente de placa. Independientemente de cuál sea este valor, el instrumento se puede graduar para que indique cero a ese valor.



Debido a que este VMTV tiene una resistencia de reja de 10 megohms en sus terminales de entrada, el conectar el VMTV a las terminales de la resistencia de 150 K ohms no alterará mucho las condiciones del circuito en prueba (10 megohms en paralelo con 150 K es efectivamente 150 K)

Cuando se conectan las uniones del medidor a una carga cuya caída de voltaje se desea medir, ese voltaje es aplicado al circuito de reja, lo cual hace que el voltaje de la reja disminuya y, en consecuencia, la corriente de placa aumentará. Este aumento en la corriente de la placa hace que la aguja del medidor gire una distancia proporcional al voltaje medido y se puede leer directamente en la escala del medidor.

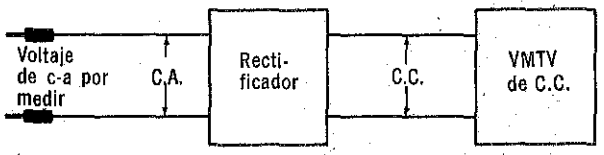
El hecho de que el resistor de reja de tubo se pueda hacer muy grande, por ejemplo 10 a 15 megohms, significa que en el circuito de reja tendrá un efecto mínimo sobre el circuito que se prueba. Esta es la ventaja principal de un VTVM sobre los voltímetros y multímetros ordinarios.

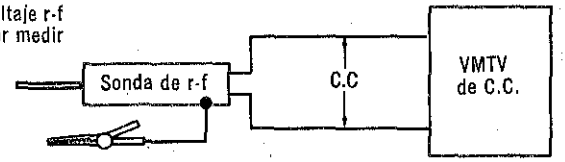
El VTVM básico ilustrado, está simplificado. Los VTVM reales están provistos de más de un tubo y un circuito medidor de fuente para mayor sensibilidad y precisión.

medición de voltaje y resistencia de c-a

Lo mismo que el voltímetro de rectificador descrito anteriormente, el VTVM de c-c se puede usar para medir voltaje de c-a usando simplemente un rectificador en el medidor para convertir el voltaje de c-a a voltaje de c-c antes de aplicarla al medidor. Además, se puede usar el VTVM para medir voltaje de c-a a frecuencias mucho más altas que el voltímetro de rectificador. Algunos VTVM pueden medir voltajes de c-a hasta de 250 megaciclos. Sin embargo, para ello debe usarse una terminal especial en el medidor, llamada *terminal de radio frecuencia* (r-f) con el VTVM. Esta terminal tiene un rectificador de cristal especial, diseñado específicamente para convertir frecuencias muy altas, de c-a a c-c.

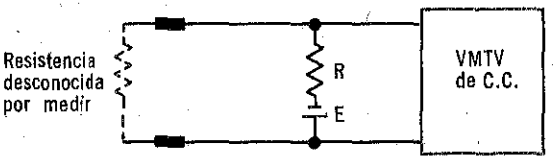
Un rectificador permite medir voltaje c-a con un VMTV de c-c.





Una sonda de r-f permite medir voltajes de c-a hasta de 250 megaciclos con un VMTV de c-c

Casi todos los VMTV's miden resistencia así como voltaje de c-c y voltaje de c-a.



Casi todos los VTVM están diseñados para medir tanto resistencia como voltaje. Igual que los circuitos básicos de ohmímetro estudiados anteriormente, se requiere una batería en circuito de ohmímetro de VTVM. En el circuito de ohmímetro del VTVM, un resistor y una batería se conectan en serie, a las terminales. Cuando las terminales de prueba se conectan a una resistencia desconocida, la corriente fluye a través del circuito del ohmímetro. Esto produce un voltaje en la resistencia desconocida y este voltaje es medido por el circuito del VTVM básico de la misma manera que se describiera en la página 5-113. El valor de la resistencia desconocida queda indicado en la parte de la escala del VTVM, calibrada en ohms.

resumen

☐ Los watímetros pueden medir potencia directamente. ☐ Un watímetro toma en consideración el factor de potencia y siempre indica potencia real. ☐ Algunos watímetros están compensados por sus propias pérdidas de potencia y, por lo tanto, indican sólo la potencia disipada en el circuito que se prueba. ☐ Un watímetro básico consta de dos bobinas estacionarias conectadas en serie y una bobina móvil. Cuando el medidor se conecta a un circuito, las bobinas estacionarias están conectadas al voltaje de la fuente y la bobina móvil está conectada en serie con la carga. ☐ Si el watímetro no está compensado, sus propias pérdidas de potencia deben restarse de cualquier lectura indicada, para obtener la potencia efectiva que mide.

☐ Un multímetro se compone de un voltímetro, un ohmímetro y un medidor de corriente, dentro de una sola caja. ☐ Un multímetro tiene sólo un elemento móvil de medición. Los derivadores, resistores multiplicadores o resistores limitadores de corriente necesarios, están conectados al circuito por medio de interruptores montados en el lado frontal de la caja.

☐ Los voltímetros de tubo al vacío (VTVM) tienen clasificaciones muy altas de ohms/volt. Debido a esto, producen lecturas de voltaje más precisos en circuitos de alta resistencia que en voltímetros ordinarios. ☐ Los voltímetros de tubo al vacío disponen de tubos al vacío. También tienen circuitos medidores de fuente para mayor sensibilidad y precisión. ☐ Los VTVM pueden servir para medir voltajes de c-a por medio de un rectificador en el medidor para convertir el voltaje de c-a a voltaje de c-c. ☐ Cuando se usa un VTVM para medir voltajes de alta frecuencia, debe usarse una terminal especial de alta frecuencia. ☐ La mayor parte de los VTVM están diseñados para medir tanto resistencia como voltaje.

preguntas de repaso

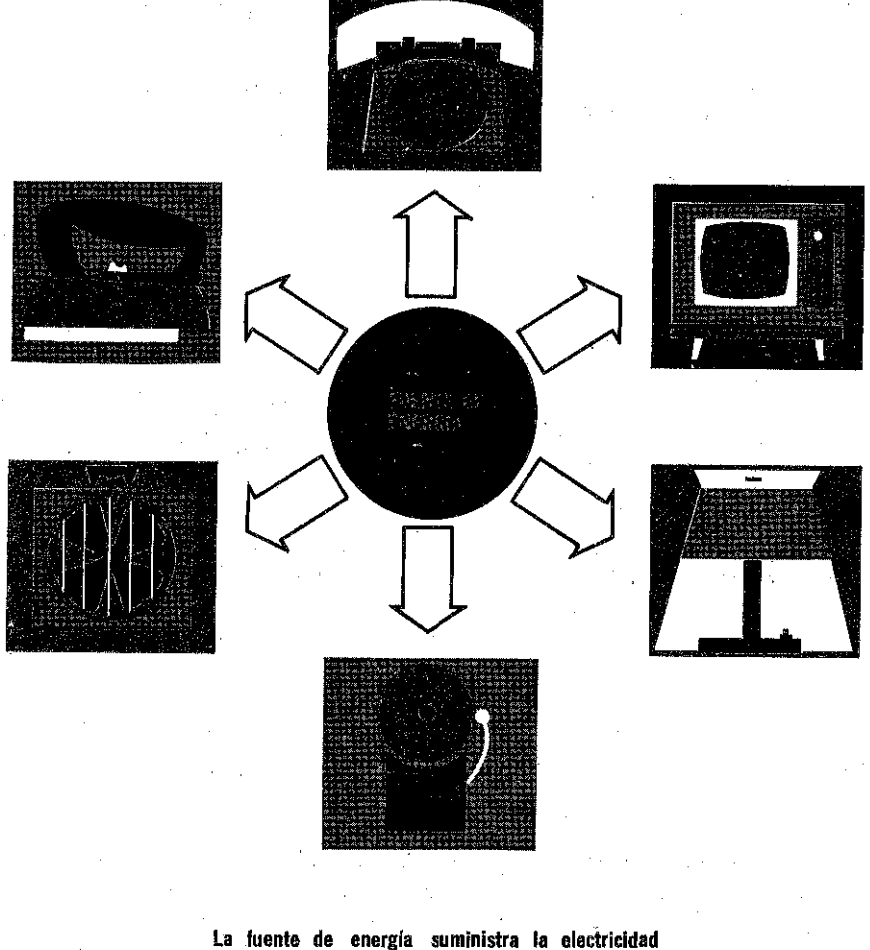
1. ¿De qué otra manera se puede medir potencia además de usar un watímetro?
2. ¿Cuáles son las ventajas de utilizar un watímetro para medir potencia?
3. ¿Qué se entiende por *watímetro compensado*?
4. Trace el diagrama esquemático de un watímetro básico.
5. Si el watímetro no está compensado y su pérdida de potencia no está indicada en la escala, ¿cómo se pueden determinar sus pérdidas de potencia?
6. ¿Qué es un *multímetro*?
7. ¿Qué es un *VTVM*?
8. ¿Cuál es la ventaja de un VTVM sobre un voltímetro ordinario?
9. ¿Qué es una *terminal de r-f*?
10. ¿Qué puede medir un VTVM además de la tensión?

6

Fuentes de energía — Celda húmeda — Pila seca — Batería secundaria (acumulador) — Celda de plomo-ácido — La celda alcalina — Características de una batería — Otras celdas voltaicas — Generadores — Generador de c-c — El devanado de campo — Devanado de armadura — Plano neutro — Regulación del voltaje del generador — Estructura del generador de c-c — Regulación del generador de c-c — Generadores de c-a — Generadores de c-a con armadura estacionaria — Fases de salida — Regulación del generador de c-a — Clasificación de los generadores de c-a — Estructura de los generadores de c-a — Comparación de generadores — Alternador de automóvil — Resistencia interna del generador — El motogenerador — El dinamotor.

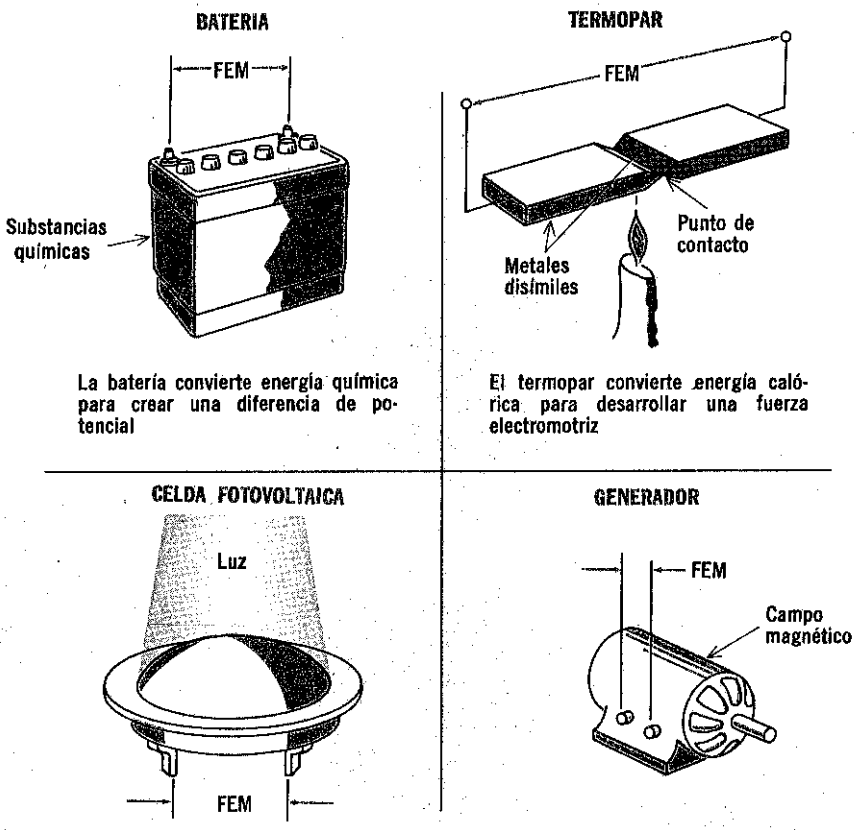
fuentes de energía

En volúmenes anteriores de esta serie se estudió qué es la electricidad, cómo aplicarla en circuitos eléctricos y cómo se mide. Ahora se estudiarán los dispositivos que la producen. A estos dispositivos se les llama *fuentes de energía.*



La fuente de energía suministra la electricidad necesaria para que el equipo eléctrico funcione

Cuando se conecta una carga a una fuente de energía fluye corriente eléctrica de la fuente a la carga. La fuente de energía debe suministrar la cantidad de voltaje y corriente que la carga necesita. Cualquier carga —por ejemplo una lámpara o un motor— sólo puede funcionar tan eficazmente como lo permita la fuente de energía.



La batería convierte energía química para crear una diferencia de potencial

El termopar convierte energía calórica para desarrollar una fuerza electromotriz

La celda voltaica convierte energía luminosa para desarrollar un voltaje

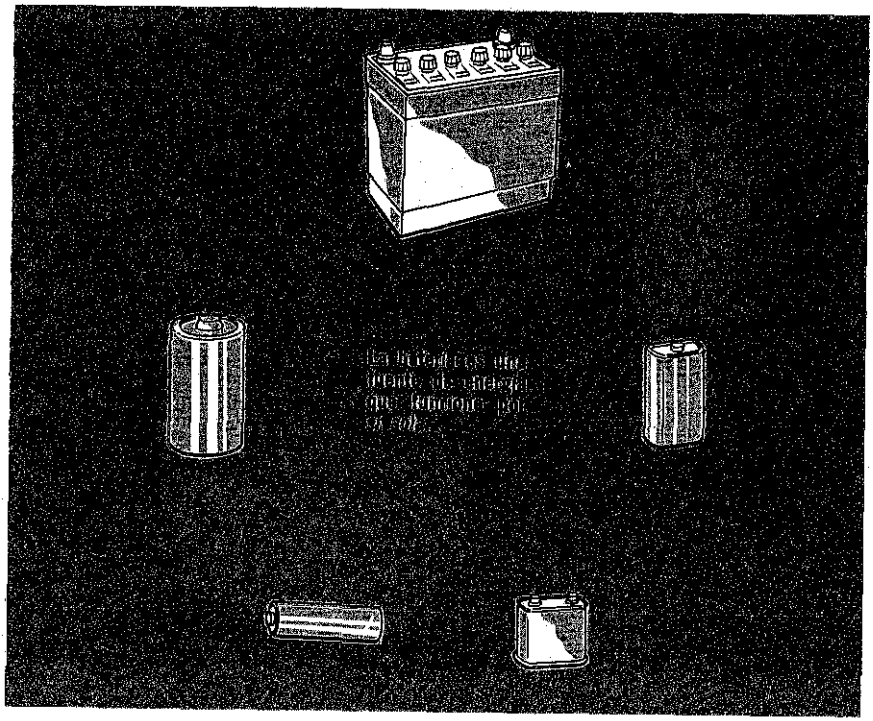
El generador convierte energía magnética para inducir una fem

tipos

Las fuentes de energía producen electricidad convirtiendo alguna otra forma de energía en fuerza eléctrica. Las fuentes de energía producen energía eléctrica originando cargas eléctricas opuestas en dos *terminales*. La *diferencia de potencial* o *fuerza electromotriz* (fem) entre las terminales, hace que la corriente eléctrica se mueva hacia la carga que está conectada a la fuente. Las fuentes de energía más comunes que existen son: la *batería, el termopar, la celda fotovoltaica* y *el generador*. Todas suministran un voltaje y una corriente eléctrica; pero cada una de ellas lo hace convirtiendo diferentes clases de energía. La *batería convierte la energía química*; *el termopar*, la *energía calorífica*; la *celda fotovoltaica*, la *energía lumínica*; y el *generador*, la *energía magnética*.

la batería

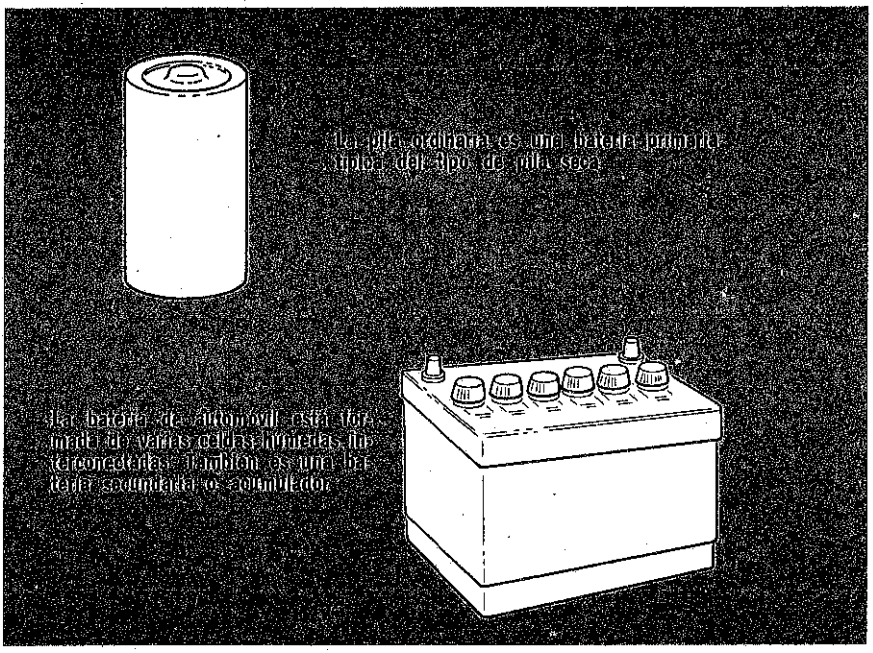
La batería es una de las fuentes de energía más importantes en la actualidad debido a que produce energía *por sí sola.* Esta es una ventaja que no tiene ninguna de las demás fuentes de energía. A todas éstas primero hay que alimentarlas con energía de fuera —por ejemplo calor, luz o energía mecánica—, antes de que puedan producir electricidad. En cambio, la energía eléctrica de la batería se produce por la energía química contenida dentro de ella misma.



La batería se usa fundamentalmente cuando se necesita una fuente de energía que sea *portátil;* por ejemplo, en lámparas y linternas, en el sistema eléctrico de un automóvil, en fotografía para encender los bulbos y lámparas, así como en radios portátiles, medidores y auxiliares de audífonos para alimentar los circuitos electrónicos; también se usan en trenes, aviones y barcos, juguetes, relojes, relojes de pulso, etcétera. De hecho, la batería es la fuente de energía más versátil que existe en la actualidad. La batería también sirve como fuente de voltaje, calibrada en un voltaje *estándar.* Típica de esta aplicación es la celda estándar que usa el National Bureau of Standards para establecer otras unidades de electricidad, tales como el ohm y el ampere.

tipos de baterías

Básicamente, las baterías se clasifican en *primarias* o *secundarias* según la manera como convierten su energía química en energía eléctrica. La *batería primaria* convierte energía química *directamente* en energía eléctrica, usando los materiales químicos que se hallan dentro de la celda para iniciar la acción. La *batería secundaria* debe cargarse *primeramente* con energía eléctrica, antes de que pueda convertir energía química en energía eléctrica. La batería secundaria suele llamarse *acumulador*, ya que almacena ("acumula") la energía que se le suministra.



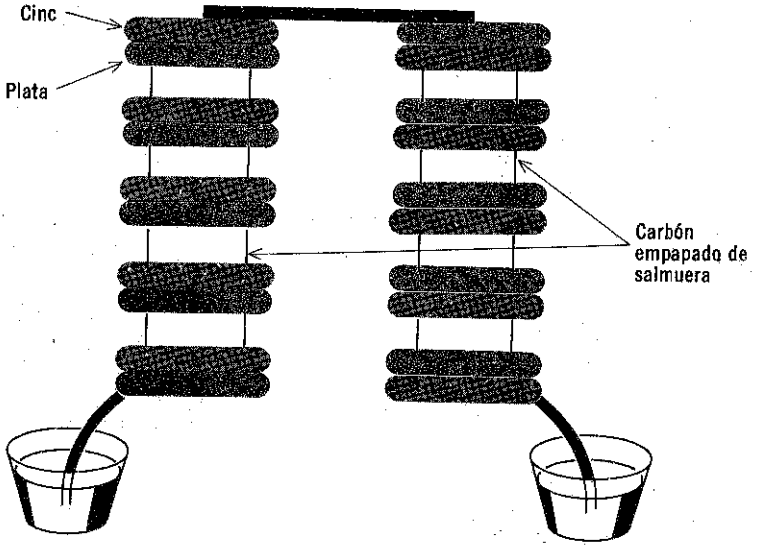
Las baterías se clasifican también en celdas húmedas o celdas secas. En la batería de celda *húmeda* se utilizan substancias químicas en estado *líquido*, en tanto que las celdas llamadas *secas* contienen una pasta química. La *celda* es la unidad básica de una batería. Una *batería* a menudo consta de numerosas celdas conectadas de manera que alimenten un voltaje o corriente mayor que la que pueda proporcionar una sola celda. Sin embargo, actualmente se utilizan indistintamente los términos celda y batería.

La batería primaria se usa principalmente cuando se requiere una cantidad limitada de corriente. Probablemente las baterías primarias más comunes son las celdas secas. La batería secundaria generalmente se emplea cuando se requiere una corriente intensa, las baterías secundarias generalmente son celdas húmedas.

datos históricos

Aunque la fecha del descubrimiento de la electricidad se remonta a unos 2,500 años, o sea, a la época de los griegos, se efectuó poco progreso en la ciencia de la electricidad hasta que no fue descubierta la celda básica a fines del siglo XVIII. Hasta entonces, no existía una fuente *conveniente* de energía eléctrica.

El primero que observó la actividad de la celda básica fue Luigi Galvani, en 1791, cuando preparaba un experimento de anatomía. Para el experimento, Galvani había separado ancas de rana disecadas, en una solución salina y las había suspendido por medio de un alambre de cobre. Notó que cada vez que tocaba una de las ancas con un escalpelo de hierro, los músculos del anca de rana se contraían. Galvani comprendió que se estaba produciendo electricidad, aunque creyó que provenía de los músculos del animal.



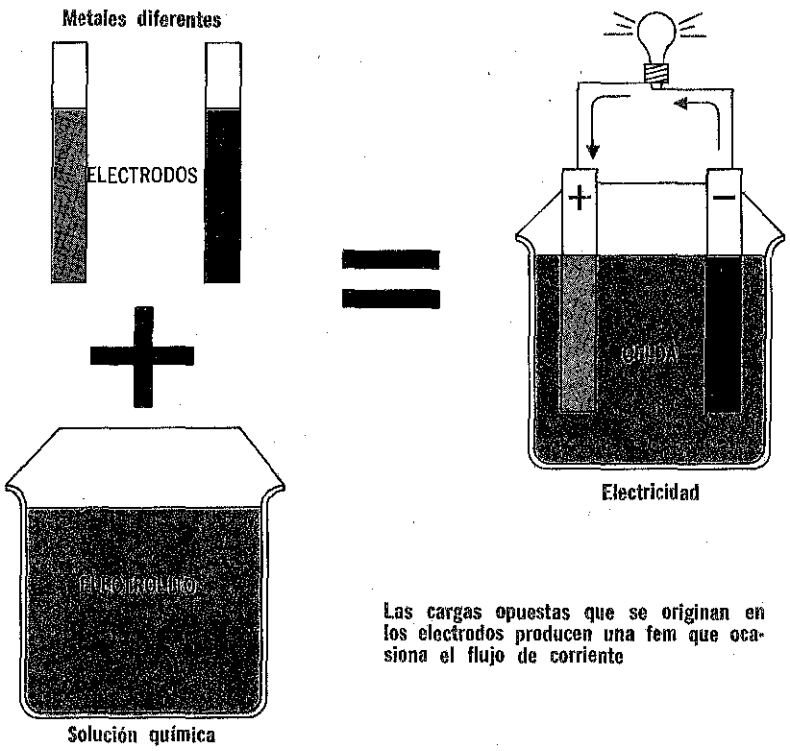
En la pila voltaica se usan hileras alternadas de discos de plata y cinc separados por discos de carbón empapados en una solución salina. Esta fue la primera batería

En 1800, Alessandro Volta repitió el experimento y observó que los músculos de la rana no producían la electricidad, sino que ésta se producía como resultado de una actividad química entre el alambre de cobre, el bisturí y la solución salina. Con base en este conocimiento, construyó la primera batería eléctrica práctica, que se conoce como *pila voltaica.*

celda húmeda primaria básica

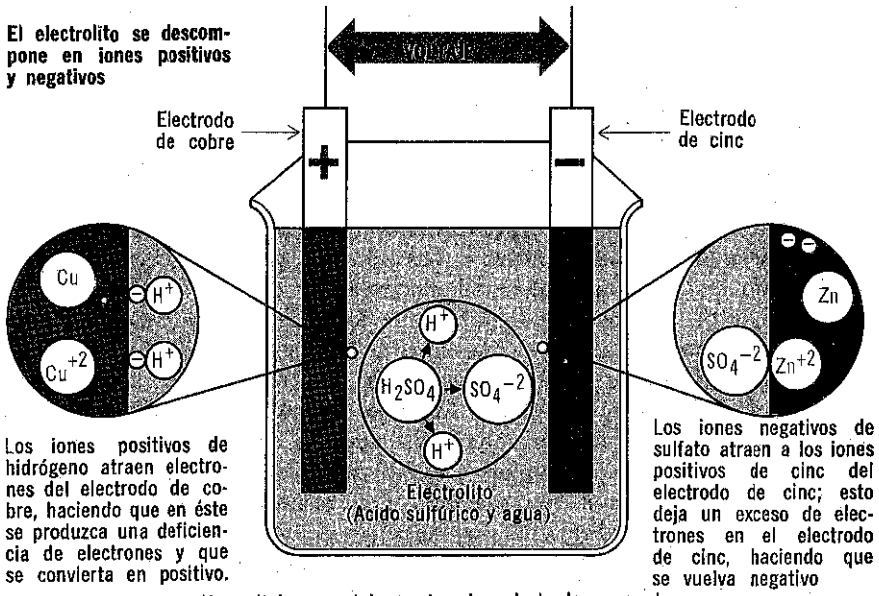
Después de que Alessandro Volta construyó su primera batería, continuó experimentando con metales y productos químicos. Así observó que cuando colocaba dos *metales diferentes* en ciertas soluciones químicas, podía producir electricidad. Esta es la celda húmeda primaria básica. En su honor, se le llama generalmente *celda voltaica*; sin embargo, a veces también se le llama celda galvánica, en honor de Galvani.

Los metales de una celda reciben el nombre de *electrodos* y la solución química se llama electrolito o electrólito. El electrolito reacciona de manera opuesta con cada uno de los dos electrodos distintos. Hace que un electrodo pierda electrones y produzca una *carga positiva*; y también hace que el otro electrodo acumule un sobrante de electrones con lo que produce una *carga negativa*. La diferencia de potencial que se produce entre las dos cargas de los electrodos es el voltaje de la celda.



Las cargas opuestas que se originan en los electrodos producen una fem que ocasiona el flujo de corriente

En la batería básica que se estudiará en las siguientes páginas, se usan electrodos de cobre y cinc y tiene electrolito de ácido sulfúrico mezclado con agua. En realidad, según se verá posteriormente se pueden usar diferentes metales y productos químicos.



Un voltaje se origina entre dos electrodos cargados

cómo se produce un voltaje

El ácido sulfúrico mezclado con agua se divide en iones hidrógeno y iones sulfato. Se producen dos *iones* hidrógeno positivos, por cada *ion* de sulfato negativo; pero cada ion hidrógeno tiene una carga positiva (H^+), en tanto que cada ion sulfato tiene dos cargas negativas (SO_4^{-2}). Por lo tanto, toda la solución es *neutra.* Cuando el electrodo de cinc se coloca en la solución, los iones sulfato atacan al cinc, haciendo que sus átomos liberen electrones. Los iones sulfato negativos atraen a los iones positivos de cinc (Zn^{+2}) del electrodo, pero los electrones liberados por los átomos de cinc permanecen en él. Así pues, el electrodo de cinc produce *electrones sobrantes* y origina una *carga negativa.*

Cuando ha originado una carga negativa suficiente, el electrodo de cinc repele a los iones sulfato para evitar toda actividad ulterior. Entonces, los iones cinc se combinan con los iones sulfato para formar moléculas neutras de sulfato de cinc. Entonces el electrolito tiene entonces más cargas positivas que negativas y, como resultado, cuando se coloca el cobre en el electrolito, los iones hidrógeno positivos atraen a los electrones libres del cobre. Estos electrones se combinan con los átomos de hidrógeno para neutralizarlos. La actividad continúa hasta que se han neutralizado iones de hidrógeno en número suficiente para que el electrolito sea nuevamente neutro. Debido a esto, en el electrodo de cobre se produce un *faltante* de electrones y, en consecuencia, una *carga positiva.* La diferencia de potencial existente entre el electrodo positivo y el electrodo negativo produce un *voltaje* en los electrodos.

suministro de corriente

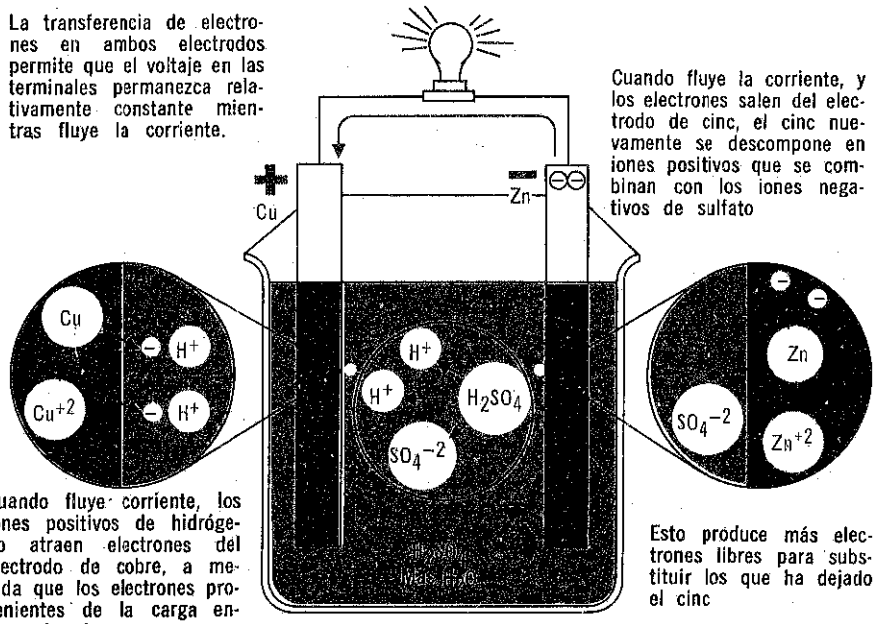
El valor del voltaje que se origina en la celda básica depende de los materiales usados para los electrodos y el electrolito. En el caso de celda clásica de cinc-cobre, el voltaje es de aproximadamente 1.08 volts. Una vez alcanzado este valor, la actividad química no cesa hasta que se conecta una carga a los electrodos. Entonces, fluyen electrones del electrodo negativo hacia el electrodo positivo y pasando a través de la carga.

Cuando los electrones salen del electrodo de cinc, su carga negativa se reduce, y de este modo es posible que los iones sulfato negativos que hay en el electrolito ataquen nuevamente al electrodo. Más átomos de cinc liberan electrones para reabastecer al electrodo. Los nuevos iones positivos de cinc se combinan con los iones sulfato negativos del electrolito para nuevamente formar sulfato de cinc. El electrolito produce otra vez un exceso de iones hidrógeno positivos, que son atraídos hacia el electrodo de cobre; ahí se combinan con electrones libres hasta que el electrolito se neutraliza una vez más.

La actividad continúa en esta forma: los electrones salen del electrodo negativo de cinc y fluyen a través de la carga hacia el electrodo positivo de cobre; los electrones que salen del cinc son substituidos por los que libera el sulfato de cinc; y los electrones que entran al cobre substituyen a los que han salido de él para neutralizar los iones hidrógeno. De esta manera, la carga de cada electrodo se mantiene casi constante y el voltaje de las terminales permanece constante mientras la celda transmite corriente.

La transferencia de electrones en ambos electrodos permite que el voltaje en las terminales permanezca relativamente constante mientras fluye la corriente.

Cuando fluye la corriente, y los electrones salen del electrodo de cinc, el cinc nuevamente se descompone en iones positivos que se combinan con los iones negativos de sulfato

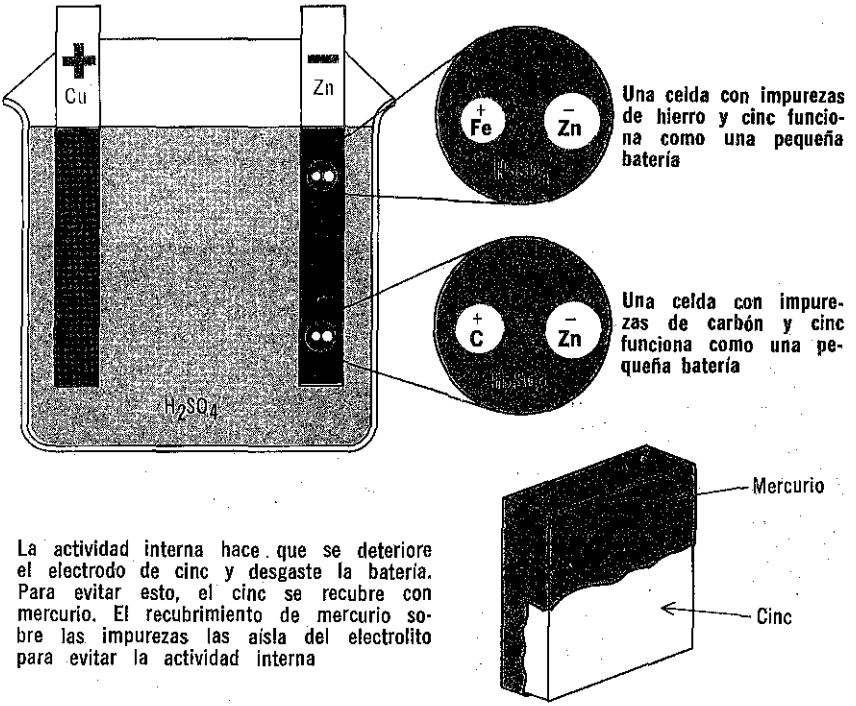


Cuando fluye corriente, los iones positivos de hidrógeno atraen electrones del electrodo de cobre, a medida que los electrones provenientes de la carga entran al cobre

Esto produce más electrones libres para substituir los que ha dejado el cinc

actividad interna

La actividad química en la celda húmeda primaria básica debe cesar cuando la celda transmite corriente. Sin embargo, esto no siempre sucede así, ya que existen algunas impurezas en el material del electrodo, por ejemplo hierro (Fe) y carbono (C). Estas impurezas *reaccionan* con el cinc y el electrolito formando muchas *celdas pequeñas* que producen corrientes eléctricas internas cerca del electrodo de cinc. Esta *actividad interna* ocurre en la celda independientemente de que ésta emita o deje de emitir corriente. Como resultado, el electrolito y los electrodos se consumen innecesariamente y la batería no tendrá la duración debida.



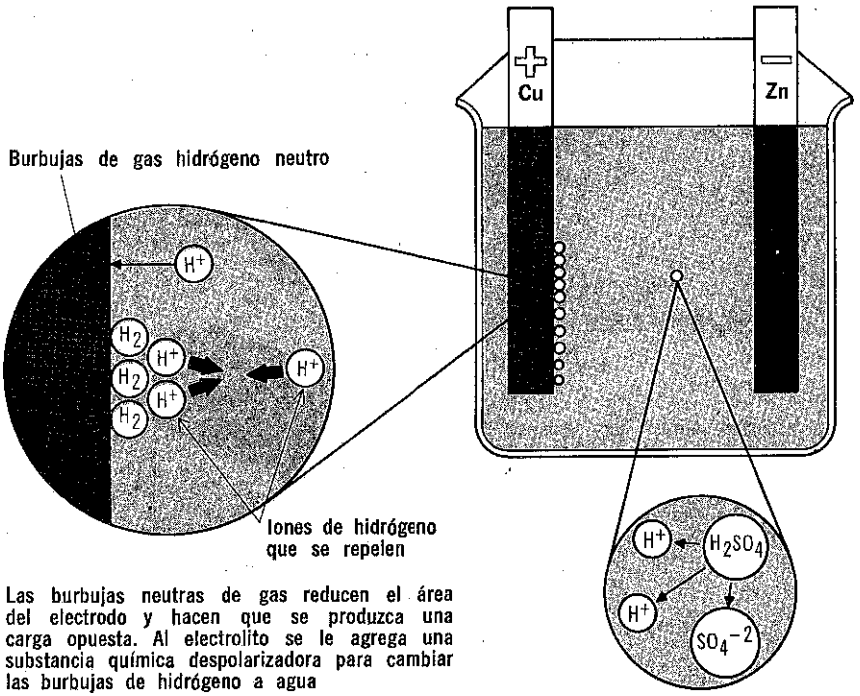
La actividad interna hace que se deteriore el electrodo de cinc y desgaste la batería. Para evitar esto, el cinc se recubre con mercurio. El recubrimiento de mercurio sobre las impurezas las aísla del electrolito para evitar la actividad interna

Para reducir la magnitud de la actividad interna, se reviste con mercurio la superficie del electrodo de cinc. A este proceso se le llama amalgamación. El cinc se disuelve en el mercurio pero sigue libre para combinarse con el electrolito. Sin embargo, las impurezas no se disuelven en el mercurio, sino que quedan cubiertas por él, con lo cual quedan aisladas del electrolito. En consecuencia, no se pueden combinar con el electrolito para producir actividad interna.

polarización

Cuando los iones hidrógeno positivos toman electrones de los electrodos de cobre, se forman burbujas neutras de hidrógeno gaseoso. Algunas de estas burbujas se adhieren al electrodo de cobre y producen una capa de gas no conductor a su alrededor. Este gas entorpece de dos maneras la actividad de la celda. La primera es que las burbujas de gas reducen la superficie activa del electrodo de cobre, de manera que llegarán a él menos iones hidrógeno. La segunda es que los iones hidrógeno positivos tienden a agruparse cerca de estas burbujas. Debido a esto, en el electrolito se produce una carga positiva local que repele a los iones hidrógeno positivos del electrodo de cobre. A este efecto se le llama *polarización*.

La polarización se debe a las burbujas de gas neutro que se juntan alrededor del electrodo positivo



Las burbujas neutras de gas reducen el área del electrodo y hacen que se produzca una carga opuesta. Al electrolito se le agrega una substancia química despolarizadora para cambiar las burbujas de hidrógeno a agua

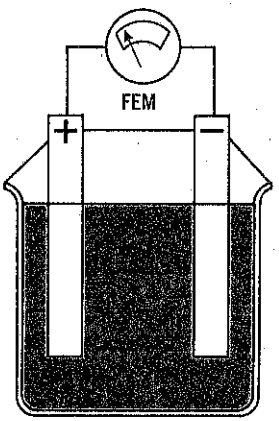
Para eliminar las burbujas de gas hidrógeno neutro se agrega un despolarizador al electrolito. Generalmente, se trata de un producto químico; por ejemplo, *bióxido de magnesio*. Este reacciona con las burbujas de hidrógeno gaseoso, formando agua. Entonces, el agua se mezcla simplemente con el electrolito, con lo cual se evita la polarización.

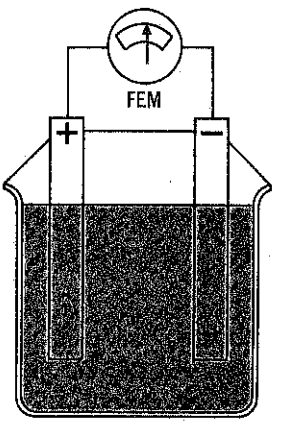
el electrólito

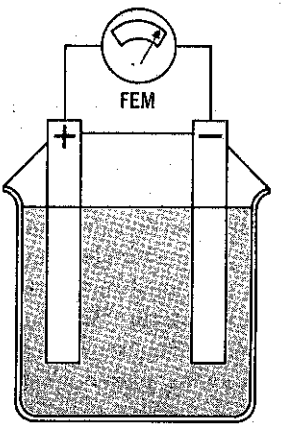
La celda básica cinc-cobre que se ha estudiado hasta ahora, usaba ácido sulfúrico mezclado con agua como electrolito. En realidad, se pueden usar diversos productos químicos. Las funciones importantes que tienen los productos químicos son:

1. Separarse en iones positivos y negativos cuando se mezclan con agua.
2. Reaccionar químicamente con uno de los electrodos por lo menos.

La intensidad con que las substancias químicas diferentes reaccionan con metales diferentes depende de cuál substancia y cuál metal se trate: por lo tanto, el electrolito usado determinará las cargas efectivamente producidas en los electrodos y determinará la cantidad de voltaje y corriente que puede alimentar la batería. Otros electrolitos comunes son el cloruro de amonio (NH_4CL), que se separa en iones amonio positivos (NH_4^+) y iones negativos de cloro (CL^-); y sulfato de cobre, que se separa en iones positivos de cobre (Cu^{+2}) y iones negativos de sulfato (SO_4^{-2}).







Pueden usarse diferentes substancias químicas como electrolitos, siempre que se puedan dividir en iones positivos y negativos cuando se mezclen con agua y reaccionen por lo menos con uno de los electrodos

La cantidad de actividad química que origine el electrolito ayudará a determinar el voltaje y el rendimiento de corriente de la pila

los electrodos

Los metales que se utilizan como electrodos en la celda básica se seleccionan de manera que, cuando reaccionan con el electrolito, uno de ellos emite electrones, originando una carga *positiva* en tanto que el otro tomará electrones para producir una carga *negativa.* La tendencia de un metal a liberar o ganar electrones depende de cuán *activo* sea químicamente el metal. Se anota una lista especial de metales para mostrar cuán activo es un metal en comparación con otro. A esta lista se le conoce como *serie electromotriz* o *galvánica* de los metales y en seguida aparece una lista parcial.

LISTA PARCIAL DE LA SERIE ELECTROMOTRIZ

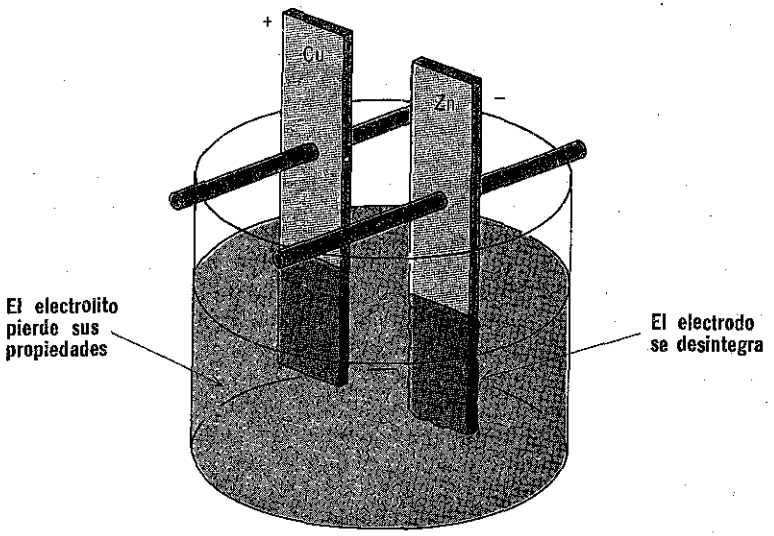
Orden de actividad	Metal	Orden de actividad	Metal
1	Sodio	10	Níquel
2	Magnesio	11	Estaño
3	Aluminio	12	Plomo
4	Manganeso	13	Antimonio
5	Cinc	14	Cobre
6	Cromo	15	Plata
7	Hierro	16	Mercurio
8	Cadmio	17	Platino
9	Cobalto	18	Oro

Los metales más activos son los que se hallan en los primeros lugares de la lista; en tanto que los que aparecen en los últimos lugares son los menos activos. Los más activos tienden a ganar electrones y producir una carga negativa, en tanto que los menos activos liberan electrones y producen una carga positiva. Para que una celda trabaje, un electrodo debe ser más activo que el otro. Cuanto más separados estén los electrodos en la lista, mayor será la tensión desarrollada. Por ejemplo, en el caso de la celda cinc-cobre, el cinc es el quinto de la lista y el cobre el décimocuarto. El cinc será el electrodo negativo pues aparece primero en la lista y el cobre será el electrodo positivo. Se producen aproximadamente 1.08 volts entre estos dos electrodos cuando se colocan en ácido sulfúrico diluido. Si se usaran carbono y cinc como electrodos en un electrolito de ácido crómico, se producirían unos 2 volts.

La clase de metales que se utilice en los electrodos no afecta la capacidad de corriente de una batería. Sin embargo, el tamaño de los electrodos sí la afecta. Cuanto mayor sea el tamaño, mayor será la capacidad de corriente. Esto se explica más ampliamente en secciones posteriores de este libro.

limitaciones

La celda húmeda primaria tiene 2 desventajas básicas. La primera es que para que funcione es necesario que el electrolito ataque al electrodo negativo para producir la actividad química. Como resultado, mientras se usa la batería, el electrodo negativo se desintegra lentamente. Y, en el momento en que una gran parte de éste ha sido agotado, no puede suministrar la cantidad de corriente necesaria. Además, el electrolito también sufre un cambio químico al reaccionar con ambos electrodos; después de determinado tiempo, la naturaleza química del electrolito cambia en tal grado que pierde muchas de sus propiedades electrolíticas y no puede producir suficiente carga en los electrodos. Sin embargo, la celda húmeda primaria se puede restaurar substituyendo el electrodo negativo y el electrolito. Pero esto conduce a la segunda desventaja.



La pila húmeda primaria funciona de tal manera que el electrodo negativo se desintegra lentamente y el electrolito pierde sus propiedades. Comercialmente no conviene construirla de modo que sea fácil de reparar

No conviene que la celda húmeda se construya de manera que sea fácil de reparar, ya que usa un electrolito líquido. Si se fabricara de consistencia sólida y a prueba de escapes de manera que fuese portátil, sería difícil de reparar y su substitución sería costosa. Como resultado, la mayor parte de las celdas húmedas primarias que se usan actualmente están construidas simplemente para usarlas en laboratorios.

Para uso comercial, cómodo y barato, se produjo la batería seca primaria.

resumen

☐ Las fuentes de energía son dispositivos que producen electricidad convirtiendo algunas otras formas de energía en energía eléctrica. ☐ Una batería es una fuente de energía que convierte energía química en energía eléctrica. ☐ La batería produce energía por sí sola de manera que las baterías satisfacen idealmente los requisitos de una fuente portátil de energía. ☐ Una batería primaria convierte directamente la energía química en energía eléctrica. ☐ Una batería secundaria debe cargarse primero con energía eléctrica, antes de que pueda producir una salida eléctrica. Las baterías secundarias reciben el nombre de acumuladores.

☐ La celda es la unidad básica de una batería. ☐ Las celdas húmedas usan productos químicos líquidos; por otra parte, las celdas secas tienen una pasta química. ☐ Las baterías primarias generalmente son del tipo de celda seca y las baterías secundarias del tipo de celda húmeda. ☐ La celda húmeda básica primaria generalmente recibe el nombre de celda voltaica; también se le suele llamar celda galvánica. ☐ Una celda consta de dos electrodos formados de metales diferentes y una solución química llamada electrolito.

☐ La acción química que tiene lugar entre los electrodos y el electrolito en una celda húmeda hace que un electrodo produzca una carga positiva y, el otro, una carga negativa, lo cual origina un voltaje en los electrodos. ☐ Cuando una celda transmite corriente a una carga, los electrones pasan del electrodo negativo a la carga y de la carga al electrodo positivo. Sin embargo, la actividad química en la celda hace que la carga en cada electrodo conserve un valor constante. ☐ El voltaje de salida de una batería y la cantidad de corriente que puede suministrar los determinan los metales que se utilizan como electrodos y la substancia química utilizada como electrolito. ☐ Cuando funciona una celda húmeda primaria, su electrodo negativo se desintegra lentamente y la naturaleza química del electrolito cambia. ☐ Una celda húmeda primaria puede repararse substituyendo el electrodo negativo y el electrolito. Sin embargo, esto suele ser impráctico.

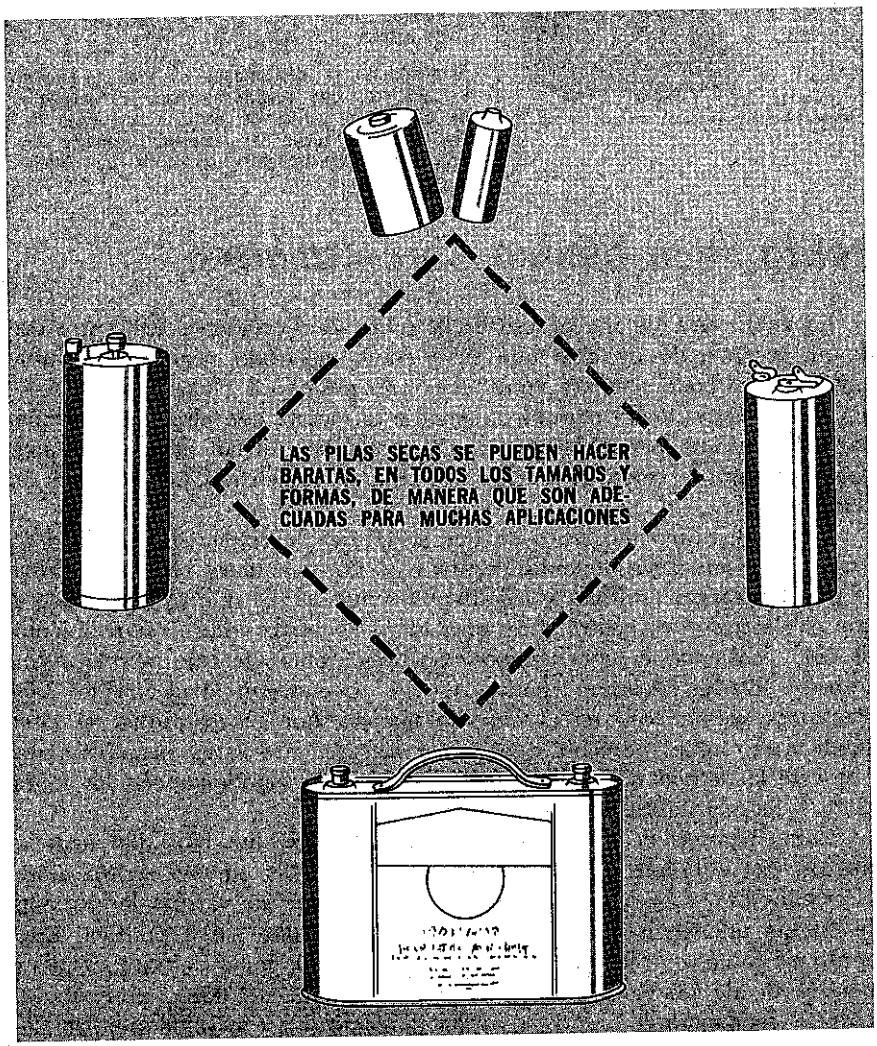
preguntas de repaso

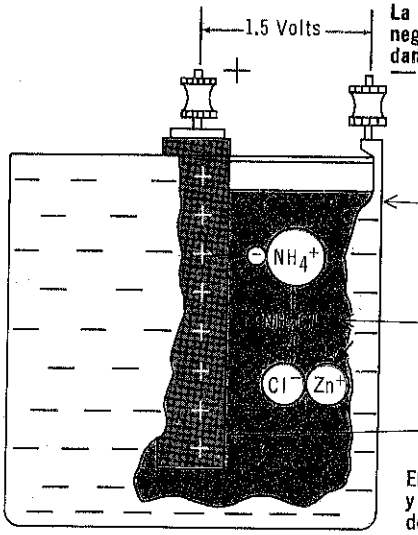
1. ¿Cuál es la diferencia que hay entre una batería *primaria* y una batería *secundaria*?
2. ¿Qué es una *celda húmeda*? ¿Qué es una *celda seca*?
3. Indique cuáles son las partes básicas de una batería.
4. Describa brevemente la forma en que una celda húmeda produce voltaje.
5. ¿Qué significa *actividad interna*?
6. ¿Qué es un *despolarizador*?
7. ¿Qué determina la tensión producida por una celda básica?
8. ¿Cuáles son las dos funciones que debe efectuar el electrolito en una celda?
9. ¿A qué se le llama *serie electromotriz de los metales*?
10. ¿Cuáles son las desventajas de la celda húmeda primaria?

la celda seca primaria básica

En la llamada celda seca generalmente se usa una *pasta electrolítica*, la cual es muy viscosa y no tiende a escapar ni a fugarse. Como resultado, la batería seca se puede construir de modo que sea barata y ligera; es la que usan extensamente el público y la industria.

La celda seca funciona en forma similar a la celda húmeda. La pasta electrolítica reacciona con los electrodos para producir una carga negativa en un electrodo y una carga positiva en el otro. La diferencia de potencial entre ambos electrodos es el voltaje de salida.





La carga positiva en la varilla y la carga negativa en el recipiente producen aproximadamente 1.5 volts en terminales

Recipiente de cinc

Electrolito en pasta, formado de cloruro de amonio con almidón o harina

Varilla de carbón

El electrolito se descompone en iones positivos y negativos, que reaccionan con el recipiente de cinc y la varilla de carbón. Los iones de cinc positivos salen del recipiente, dejando un sobrante de electrones y la varilla de carbón libera electrones

celda seca básica cinc-carbono

La celda seca de mayor uso es la celda de Leclanché. Está provista de un receptáculo de cinc que sirve como electrodo negativo, de una varilla de carbono que usa como electrodo positivo y cloruro de amonio que es el electrolito. El cloruro de amonio se mezcla con almidón o harina para formar una pasta electrolítica. También se utilizan otros materiales para construir la celda de Leclanché, pero se comenzará por estudiar la celda básica.

Desde el mismo momento en que se fabrica la celda, el electrolito se descompone en iones amonio positivos (NH_4^+) y iones cloro negativos (Cl^-). Las cargas positivas y negativas son iguales en número, de manera que el electrolito es neutro. Los iones cloro negativos atacan al recipiente de cinc, ocasionando su descomposición. Los átomos de cinc pierden electrones y liberan iones cinc positivos (Zn^+) que llegan al electrolito. Los electrones permanecen en el cinc de manera que el recipiente de cinc produce electrones de sobra y acumula la suficiente carga negativa para que cese la actividad. Los iones cinc positivos se combinan con los iones cloro y los neutraliza, formando cloruro de cinc.

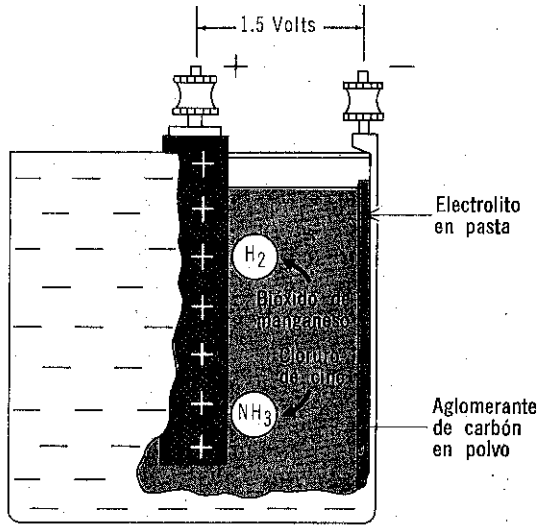
Como algunos de los iones negativos del electrolito han sido neutralizados, éste adquiere una carga positiva y los iones amonio atraen a los electrones libres de la varilla de carbono. Así, en la varilla de carbono se origina un déficit de electrones y se produce una carga positiva. Esto continúa hasta que los suficientes iones amonio ganan electrones para neutralizar de nuevo al electrolito. La diferencia de potencial existente entre el recipiente de cinc y la varilla de carbono en la celda seca de Leclanché es de aproximadamente 1.5 volts.

polarización y actividad interna

Las celdas secas sufren los efectos de la polarización y actividad interna de la misma manera que las húmedas y las condiciones se corrigen de manera similar. El recipiente de cinc de una celda seca generalmente se amalgama para reducir la actividad interna.

Para corregir la polarización, la celda Leclanché está provista de una mezcla de carbono pulverizado, bióxido de manganeso y cloruro de cinc. El carbono pulverizado sirve como aglutinante pastoso cuando se mezcla con las substancias químicas.

En la pila seca también se desarrollan polarización y actividad interna.

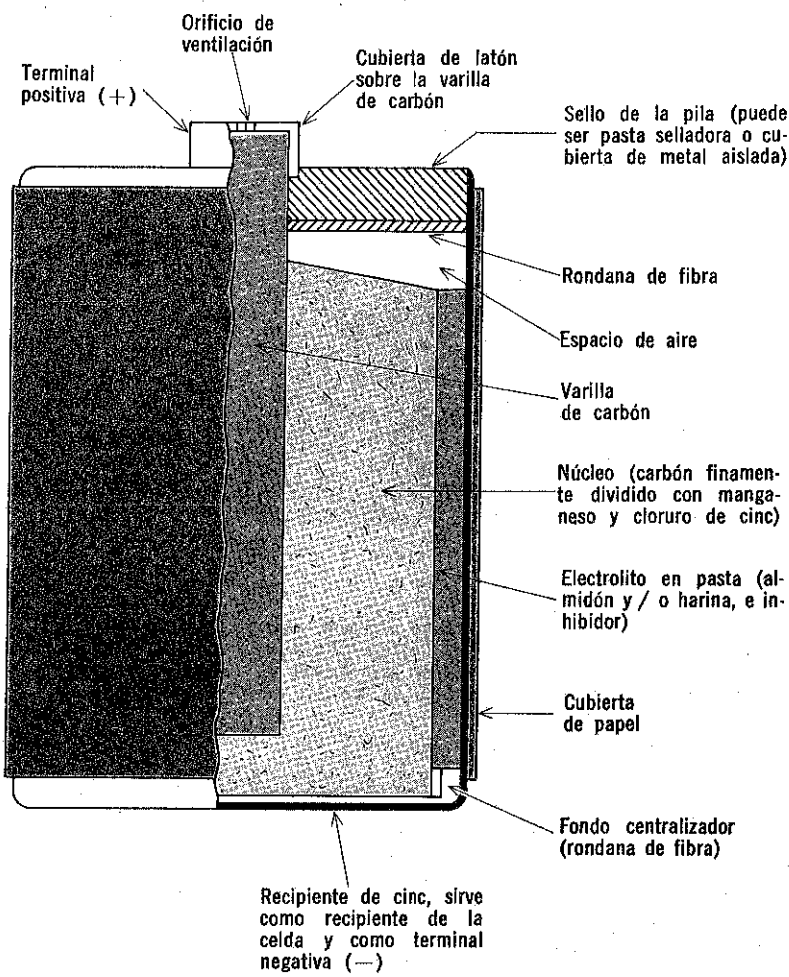


El recipiente de cinc generalmente se amalgama para mantener reducida la actividad interna. Y la polarización, debida al gas hidrógeno (H_2) y el gas amoníaco (NH_3) se reduce cuando se usan bióxido de manganeso y cloruro de cinc. Estas substancias químicas se mezclan con un aglomerante de carbón pulverizado

Cuando los iones amonio (NH_4^+) reaccionan con la varilla de carbono, se transforman en amonio e hidrógeno gaseoso. El bióxido de manganeso se combina con el hidrógeno gaseoso para formar agua y el cloruro de cinc se combina con el gas amoniaco para formar cloruro de amonio, el cual elimina las burbujas de gas que se forman alrededor de la varilla de carbono; el producto químico resultante se mezcla con el carbono pulverizado.

estructura de la celda seca leclanché

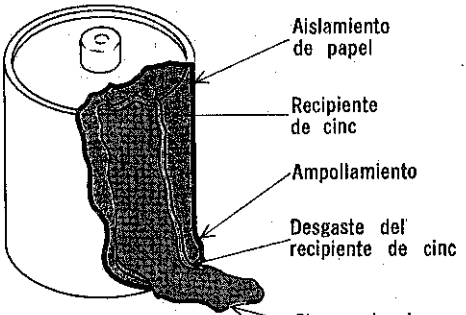
Según se ha explicado, la celda seca tiene una estructura muy diferente a la de la celda húmeda. La ilustración representa una pila ordinaria para lámpara de mano. El casquillo de la varilla de carbono es la terminal positiva y el fondo del recipiente de cinc es la terminal negativa. Se usan sellos para que la batería sea relativamente a prueba de fugas y generalmente el recipiente de cinc se cubre con una envoltura de papel; este papel actúa como aislante y también sirve para imprimir en él la información necesaria acerca de la batería.



celdas secas a prueba de fugas

Aunque la celda seca ordinaria está provista de sellos para que sea a prueba de fugas, sólo permanecerá cerrada en tanto el recipiente de cinc permanezca intacto. Sin embargo, téngase presente que la batería funciona debido a que el electrolito ataca al recipiente de cinc y, cuando la batería transmite corriente, el recipiente se va desgastando lentamente, según se va formando cloruro de cinc con el electrolito. Cuando el recipiente de cinc se consume y aparecen orificios, la batería deja de ser a prueba de fugas. La humedad puede entrar y hacer que la batería se dilate y que se forme cloruro de cinc, cuando el electrolito reacciona con el recipiente de cinc, y pueden producirse fugas. La substancia blanca que puede apreciarse en las baterías desgastadas es cloruro de cinc.

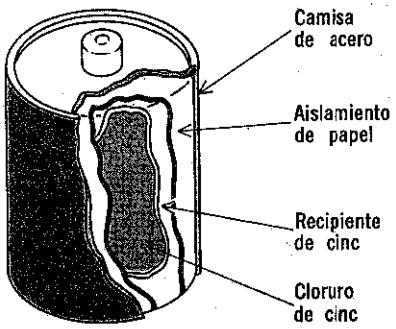
Cuando el recipiente de cinc se desgasta, la batería ordinaria ya no es a prueba de fugas



BATERIA TIPO "D"

Para evitar esta dilatación y fuga, las baterías de buena calidad están protegidas por un forro de acero. El resto de la batería es ligeramente más pequeño, de manera que el tamaño exterior no cambia. Entre el forro de acero y el recipiente de cinc se coloca un tubo de papel, que sirve como aislante.

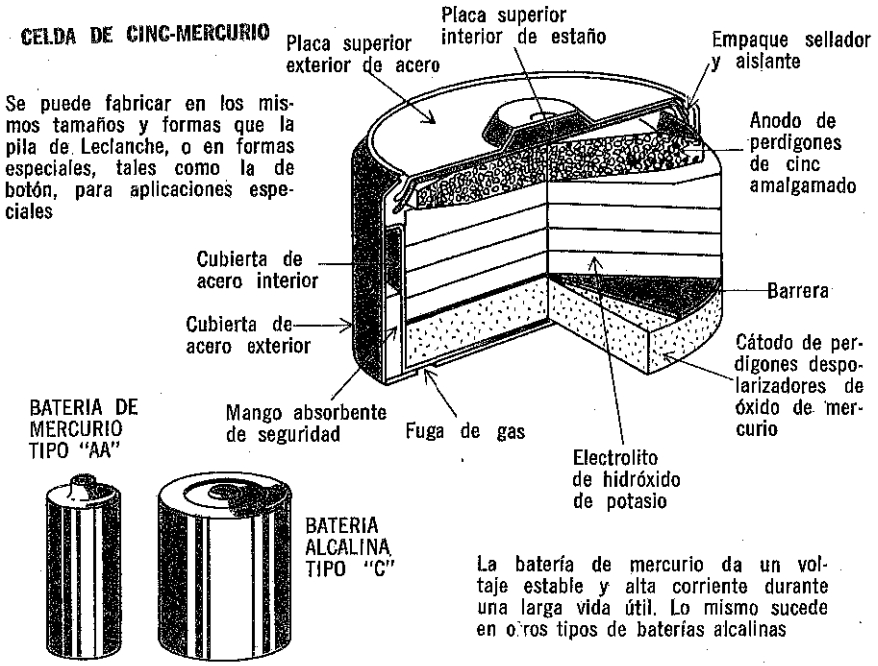
BATERIA TIPO "D"



Cuando el recipiente de cinc se deteriora al punto en que se producen agujeros, la camisa de acero evita que entre la humedad y escapen las substancias químicas. Las baterías con camisa de acero son a prueba de fugas

otros tipos de celdas secas

Igual que en el caso de celdas húmedas, en las celdas secas se pueden emplear diversos materiales para sus electrodos y diferentes substancias químicas para el electrolito. Sin embargo, la celda de Leclanché, que es de cinc-carbono con electrolito de cloruro de amonio es la más usada. En algunas otras baterías se usan magnesio, plata y cloruro de plata, o bien, cinc y cloruro de cinc. El uso de diferentes materiales para otras baterías producen diferentes valores de voltaje y corriente nominales.



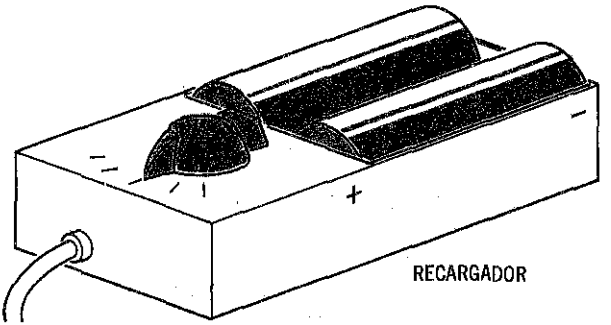
Otra celda seca muy usada es la *batería de mercurio*. Consta de un electrodo negativo de cinc y un electrodo positivo que es una mezcla de óxido mercúrico y grafito. El electrolito es una pasta de hidróxido de potasio e hidróxido de cinc. El voltaje sin carga de esta celda es de 1.34 volts, y cae a 1.31 y a 1.24 volts cuando se le aplica corriente normal. Es más costosa que la celda Leclanché, pero su clasificación de *corriente constante* es más alta y mantiene un voltaje continuo de manera que se puede usar como referencia de voltaje.

En tanto que otras celdas tienen electrolitos ácidos, en la celda de mercurio el electrolito es de una substancia química *alcalina*. Las unidades que tienen estos electrolitos se llaman *baterías alcalinas*. Hay otros tipos de celdas secas alcalinas, además de la celda de mercurio. En general, las celdas alcalinas duran más que las de ácido y funcionan de manera completamente diferente, según se explicará posteriormente.

limitaciones

La celda *seca* primaria tiene las mismas limitaciones básicas que la celda *húmeda* primaria. El electrodo negativo se consume hasta que la celda queda inútil. Sin embargo, la celda seca está hecha como una unidad sellada compacta, de manera que no puede repararse como la celda húmeda. Aunque generalmente debe substituirse, en algunos casos es posible prolongar la vida útil de una celda, mediante un proceso que se conoce como *recarga*. Las substancias químicas que se agregan al electrolito para reducir al máximo la polarización restringen notablemente la formación de burbujas de gas alrededor del electrodo positivo. Sin embargo, cuanto más se use una batería, más se consumen los elementos químicos que la componen y, al cabo de cierto lapso, la polarización se hace cada vez más problemática. Las burbujas de gas no tardan en acumularse hasta el punto en que la batería se *debilita*; pero, en tanto que el electrodo negativo no se desintegre demasiado y el electrolito no se diluya excesivamente, la celda conserva suficiente energía química para funcionar, si se puede reducir la polarización. La naturaleza exacta del proceso de recarga no es del todo clara.

A veces las pilas secas se pueden regenerar para alargar su vida útil



Para recargar una celda seca, debe aplicarse un voltaje de polaridad inversa. Esto hace que la corriente en la batería fluya en dirección inversa, produciendo la electrólisis en el electrolito. Entonces, los átomos de gas se ionizan recombinándose con los elementos químicos para limpiar el área que rodea al electrodo positivo. La batería se puede usar entonces durante un periodo breve, pero probablemente no tarde en necesitar que se la cargue nuevamente. Al cabo de unas cuantas veces, el proceso de recarga deja de surtir efecto. Naturalmente, esto depende principalmente de lo débil que sea la batería. En todo caso, el proceso de recarga sólo *alarga* la vida útil de una celda seca.

Frecuentemente, a los aparatos usados para recargar una celda seca se les llama *cargadores,* pero en realidad no cargan la batería. Esto se explicará cuando se estudie la celda secundaria o acumulador.

resumen

☐ En la celda seca se usa una pasta viscosa como electrolito. ☐ Las celdas secas funcionan de una manera similar a las celdas húmedas. Los electrodos interactúan con el electrolito de manera que se origina una diferencia de potencial entre los electrodos. ☐ La celda de Leclanché es el tipo de celda seca que más se usa. Tiene un voltaje de salida de unos 1.5 volts. ☐ El recipiente de cinc de la celda Leclanché sirve como electrodo negativo y se usa una varilla de carbono como electrodo positivo. ☐ El electrolito de la celda Leclanché se compone de cloruro de amonio y almidón o harina que, mezclado, forman una pasta. ☐ Generalmente se amalgama el recipiente de cinc de la celda Leclanché para reducir la actividad interna.

☐ Los tipos más caros de celdas secas se hacen a prueba de fugas envolviéndolos con forros de acero. Los forros mantienen la propiedad a prueba de fugas de la celda aun después de haberse desgastado el recipiente de cinc y de haberse agujerado. ☐ En una celda de mercurio, el electrodo negativo es de cinc y el electrodo positivo es una mezcla de óxido mercúrico y grafito. El electrolito es una pasta de hidróxido de potasio-hidróxido de cinc. ☐ La celda de mercurio es una celda alcalina, ya que el electrolito es un producto alcalino, no ácido, como el caso de la celda de Leclanché.

☐ El voltaje de una celda de mercurio es de 1.34 volts bajo condiciones de no carga y entre 1.24 y 1.31 cuando suministra corriente normal. ☐ Las celdas de mercurio se pueden usar como referencias de voltaje debido a su constante voltaje de salida. ☐ Aunque las celdas secas no pueden repararse como las celdas húmedas, su vida útil se puede prolongar mediante recarga. ☐ Después de recargada, una celda seca puede servir por un breve periodo.

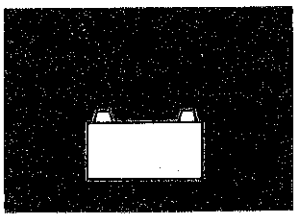
preguntas de repaso

1. ¿Por qué se le llama *celda seca* a esta batería?
2. ¿Cuáles son los materiales empleados en los electrodos y el electrolito en la celda de Leclanché?
3. Dibuje un esquema de una celda básica de Leclanché.
4. ¿Cuál es el voltaje de salida de una celda de Leclanché? ¿Cuál es el de la celda de mercurio?
5. Si se observa una substancia blanca sobre una celda, ¿qué es lo que probablemente indica esto?
6. ¿Cómo se construye una celda seca a prueba de fugas?
7. ¿Qué ventaja tiene una celda de mercurio sobre una celda de Leclanché?
8. ¿Qué es una batería alcalina?
9. ¿En qué consiste la recarga?
10. ¿Puede ser recargada varias veces una celda seca? Explique.

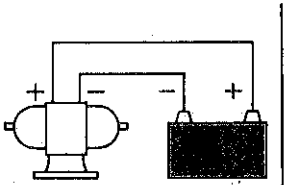
batería secundaria (acumulador)

Las celdas primarias tienen graves limitaciones debido a que su vida útil es relativamente breve. El proceso de recarga de la celda seca sólo es temporal. La celda húmeda se puede reparar; pero, debido a esto, es delicada y generalmente su uso es meramente experimental.

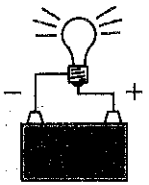
La celda secundaria se creó para *una vida útil muy larga*, de manera que puede ser construida de consistencia sólida para aplicaciones portátiles. La diferencia básica entre la celda primaria y la secundaria es la siguiente. La celda primaria convierte la energía química que tiene en energía eléctrica y, al hacerlo, se destruye lentamente. Al principio, la celda secundaria no tiene mucha energía electroquímica y, primero, hay que cargarla, suministrándole la energía que necesita. Entonces, la celda *almacena* dicha energía hasta que ésta se utilice. Por esta razón, a la celda seca también se le llama acumulador.



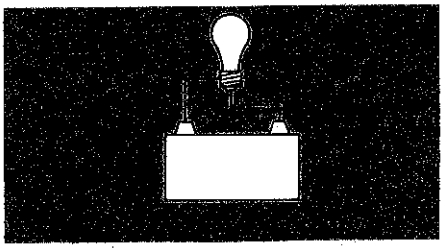
Una celda secundaria descargada . . .



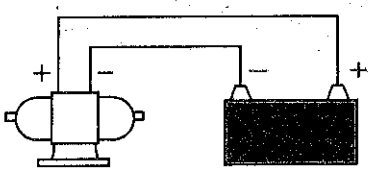
se puede cargar con la energía. Almacena la energía como energía química y . . .



convierte la energía química nuevamente en energía eléctrica, cuando se utiliza, hasta que . . .



la celda se descarga . . .

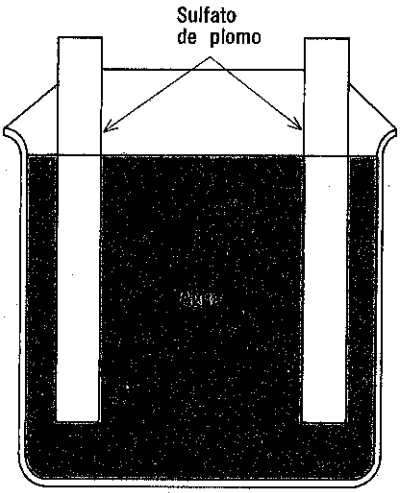


Entonces, debe cargarse nuevamente

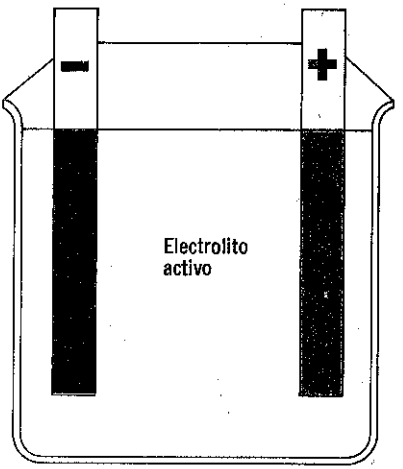
Cuando se toma energía eléctrica del acumulador, se dice que la celda está *descargándose*. Cuando la celda está completamente descargada, ya no puede transmitir energía eléctrica. Pero, a diferencia de la celda primaria, se puede *recargar*. Básicamente, al cargarse, la celda secundaria *convierte* la energía eléctrica en energía química. Luego, al descargarse *vuelve a convertir* la energía química en energía eléctrica. Los acumuladores que más se usan son 1) el de plomo-ácido y 2) varios tipos de acumuladores alcalinos.

celda básica de plomo-ácido

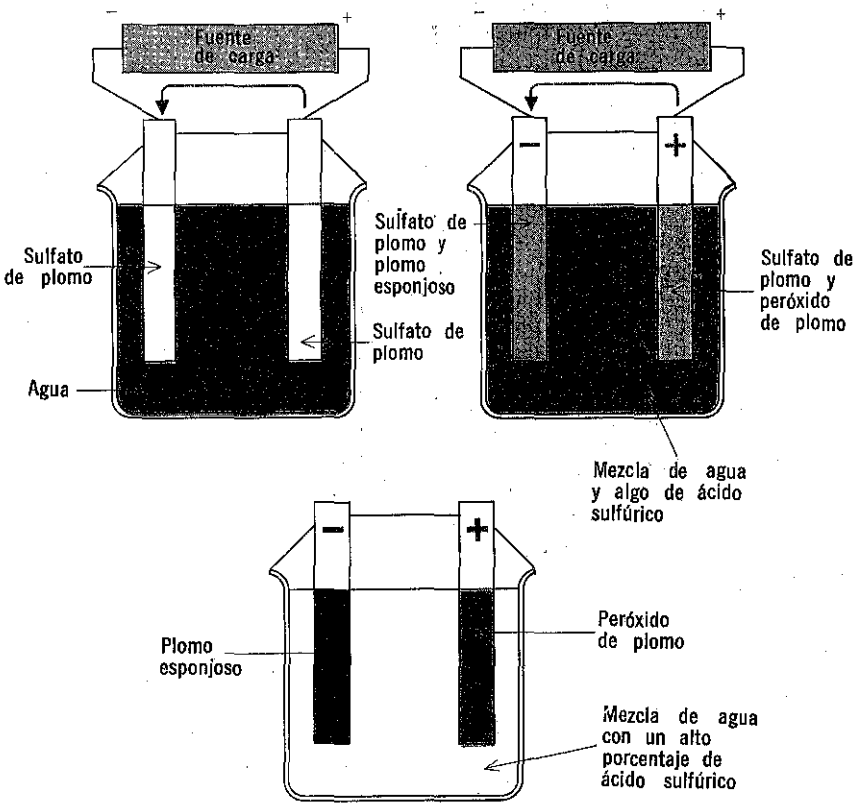
La batería de plomo-ácido se puede obtener nueva, ya sea cargada o descargada, y con el electrolito incluido (húmeda) o no incluido (seca). En este estudio, se comenzará analizando una celda completamente descargada que contiene electrolito. Esta celda consta de dos electrodos, ambos hechos de sulfato de plomo ($PbSO_4$) y un electrolito que en su mayor parte es *agua destilada* (pura). Hay algo de ácido sulfúrico mezclado con el agua; pero en el estado de descarga la concentración es insignificante. Por lo tanto, la celda de plomo-ácido, cuando está descargada no satisface ninguno de los requisitos de una batería: Sus electrodos *no* están hechos de *metales distintos* y su electrolito *no ataca* a ninguno de los electrodos.



La pila plomo-ácido descargada no puede generar energía eléctrica debido a que sus electrodos no son metales distintos y su electrolito no reaccionará con los electrodos



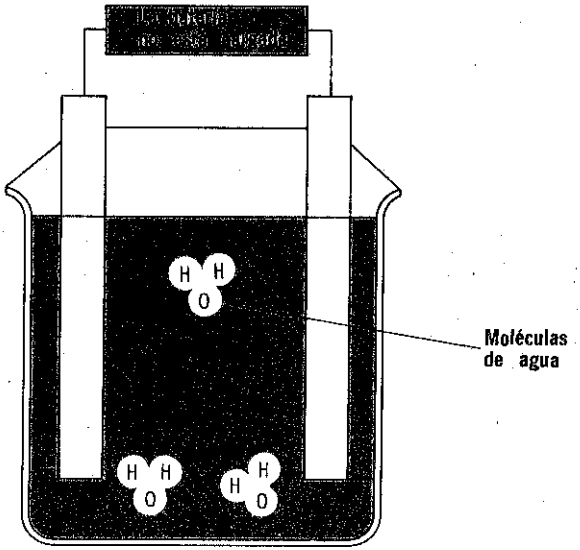
Para que la pila de plomo-ácido pueda trabajar, sus electrodos deben ser diferentes y debe activarse el electrolito



Cuando la corriente de carga transforma los electrodos de sulfato de plomo en plomo esponjoso y peróxido de plomo, y produce un alto porcentaje de ácido sulfúrico en el agua, la batería está totalmente cargada.

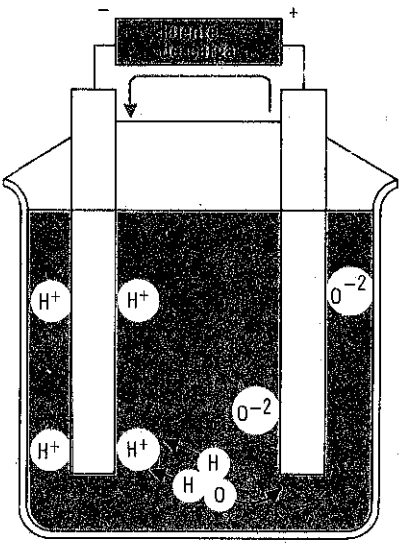
carga

Para que la celda de plomo-ácido pueda proporcionar energía eléctrica, debe tener dos electrodos *diferentes* y un electrolito *activo*. Se tiene esta condición a la celda cuando se la carga por medio de una corriente eléctrica. Debido a la electrólisis, el agua del electrolito se divide e inicia una serie de reacciones químicas. En un electrodo, el sulfato de plomo ($PbSO_4$) se transforma en plomo esponjoso o plomo suave (Pb) y en el otro electrodo, el sulfato de plomo se convierte en peróxido de plomo (PbO_2). Al mismo tiempo, una buena parte del electrolito de agua (H_2O) se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Cuando esto sucede, la batería se carga: tiene dos metales diferentes como electrodos y un electrolito químicamente activo. Las fases de este cambio se estudian en las páginas siguientes.



electrólisis

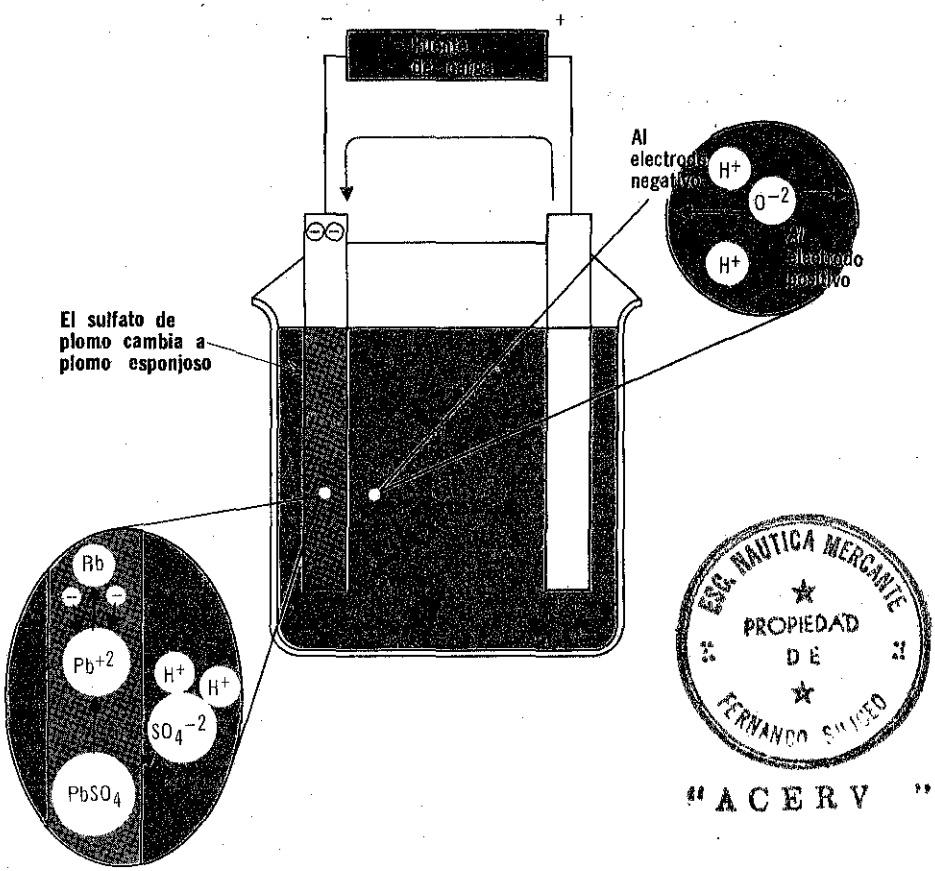
Desde el mismo momento en que se inicia la carga, la corriente que pasa por la batería origina la *electrólisis* del agua. Las moléculas del agua (H_2O) comienzan a separarse en sus iones constituyentes. Por cada *ion oxígeno negativo* (O^{-2}) producido, existen dos *iones hidrógeno positivos* (H^+), de manera que el electrolito es neutro.



Las moléculas de agua se dividen en iones hidrógeno positivos y iones oxígeno negativos

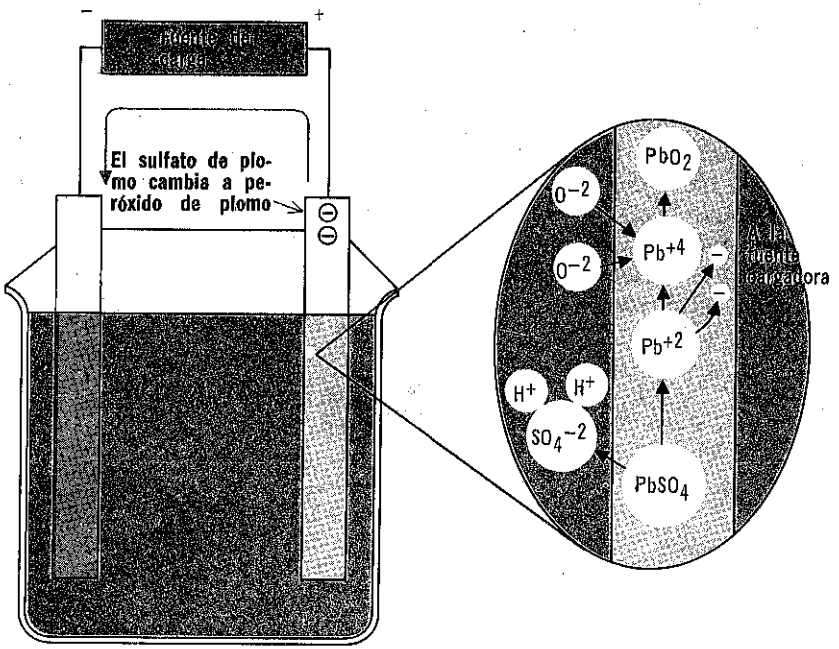
el electrodo negativo

Después de que la electrólisis ha descompuesto al agua en iones hidrógeno positivos (H^+) y iones oxígeno negativos (O^{-2}), la atracción de los iones hidrógeno positivos hace que se disocien las moléculas de sulfato de plomo ($PbSO_4$) en iones plomo positivos (Pb^{+2}) y iones sulfato negativos (SO_4^{-2}). Los iones hidrógeno positivos atraen a los iones sulfato hacia afuera del electrodo, con lo cual, en el electrodo sólo quedan iones plomo positivos.



ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD DE
FERNANDO SUJEO
"ACERV"

Los electrones de la corriente de carga son atraídos hacia los iones plomo positivos y los neutralizan, produciendo plomo esponjoso (Pb). Es decir, la actividad consiste en que el electrodo negativo que primero era de sulfato de plomo, libera iones sulfato y se convierte en una mezcla de sulfato de plomo y plomo mientras se esté cargando la celda; y continúa liberando iones sulfato hasta convertirse en plomo esponjoso puro, cuando la batería está completamente cargada.



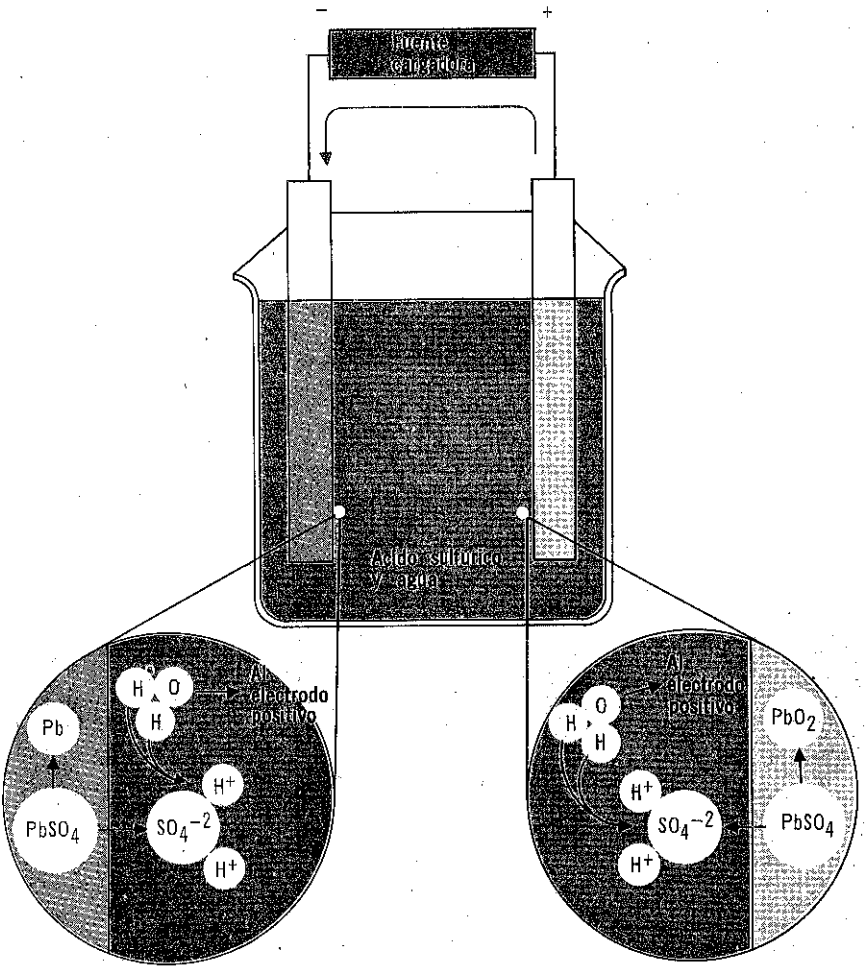
el electrodo positivo

La actividad que tiene lugar en el electrodo positivo es similar a la que ocurre en el electrodo negativo. Debido a la atracción positiva de los iones hidrógeno (H^+) que hay en el agua, el sulfato de plomo ($PbSO_4$) se disocia en iones plomo positivos (Pb^{+2}) y iones sulfato negativos (SO_4^{-2}). Los iones hidrógeno positivos (H^+) atraen a los iones sulfato hacia afuera del electrodo, lo cual hace que los iones plomo positivos se queden en el electrodo. Esto es lo mismo que sucede en el electrodo negativo; pero, ahí los iones plomo podían neutralizarse tomando dos electrones de la corriente de carga.

Sin embargo, como la corriente de carga se aleja del electrodo positivo, en éste no sucede tal cosa. En cambio, la atracción positiva de la fuente de carga saca dos electrones del Pb^{+2} para mantener circulando a la corriente de carga. Esto produce Pb^{+4}. Entonces, el Pb^{+4} atrae a dos iones oxígeno negativos (O^{-2}) del electrolito y se combina con ellos para convertirse en peróxido de plomo neutro (PbO_2). Por lo tanto, lo que sucede es que, al principio, el electrodo positivo es de sulfato de plomo, luego libera iones sulfato y toma iones oxígeno; así, mientras se carga la celda, se convierte en una mezcla de sulfato de plomo y peróxido de plomo. El electrodo positivo continúa liberando iones sulfato y tomando iones oxígeno hasta que se convierte en puro peróxido de plomo, cuando la batería queda completamente cargada.

el electrólito

Téngase presente que, al principio de la carga, la electrólisis hacía que cada molécula de agua (H_2O) se separara en dos iones hidrógeno (H^+) y un ion oxígeno (O^{-2}). Los iones hidrógeno positivos atraían iones sulfato negativos (SO_4^{-2}) de cada electrodo. Estas combinaciones producen H_2SO_4, o sea *ácido sulfúrico*. El electrodo positivo toma iones oxígeno negativos del electrolito. Por lo tanto, al continuar cargándose la celda, el electrolito que era pura agua se convierte en mezcla de agua y ácido sulfúrico, y, mientras más se prolongue la carga, mayor cantidad de agua es substituida por ácido sulfúrico. Cuando la batería está completamente cargada, el electrolito contiene un alto porcentaje de ácido sulfúrico en comparación con su contenido de agua.

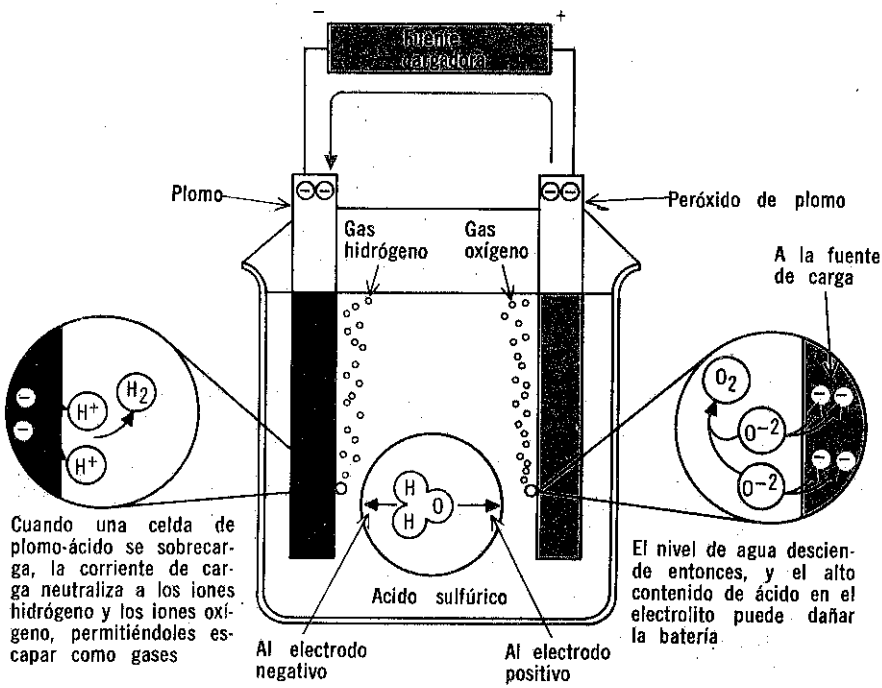


sobrecarga

Cuando la celda de plomo-ácido se carga completamente, el electrodo negativo se vuelve puro plomo esponjoso (Pb) y el electrodo positivo se convierte en puro peróxido de plomo (PbO_2). Estos electrodos ya no contienen iones sulfato (SO_4^{-2}) que se combinen con los iones hidrógeno positivos (H^+) de la solución y el electrodo positivo deja de absorber los iones oxígeno negativos (O^{-2}). Entonces, los iones hidrógeno son atraídos hacia el electrodo negativo y los iones oxígeno son atraídos hacia el electrodo positivo.

Los electrones que suministra la corriente de carga salen del electrodo negativo y se combinan con los iones hidrógeno para producir hidrógeno gaseoso neutro, en forma de burbujas. Los iones oxígeno negativos ceden electrones al electrodo positivo y se transforman en burbujas neutras de oxígeno gaseoso. Estas burbujas se acumulan y se elevan en forma de *gases,* los cuales salen de la batería a través de *orificios de ventilación.* Como resultado, la carga ulterior deja de transformar el agua en ácido sulfúrico. En cambio, se pierde agua en forma de hidrógeno y oxígeno gaseosos.

El nivel de agua continúa descendiendo hasta que la relación de ácido sulfúrico a agua es demasiado elevada y el alto contenido ácido daña a los electrodos. Los gases que escapan también son peligrosos, debido a que constituyen una mezcla explosiva. Cuando estos gases se forman durante la sobrecarga, el electrolito parece "hervir", al elevarse los gases.



resumen

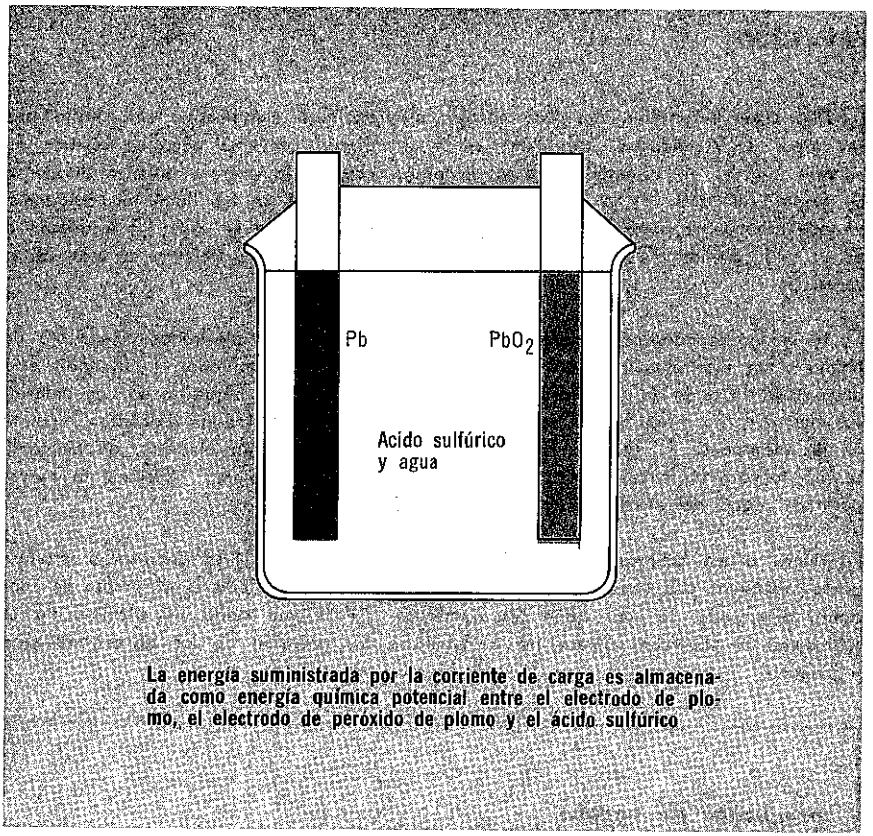
☐ Una celda secundaria no tiene energía electroquímica significativa sino hasta que se carga. ☐ Cuando se carga una celda secundaria, convierte energía eléctrica en energía química. ☐ Cuando la celda descarga, convierte la energía química de nuevo en energía eléctrica. ☐ A las celdas secundarias también se les llama acumuladores, ya que después de cargadas, almacenan la energía hasta que se usa. ☐ A diferencia de la celda primaria, una celda secundaria se puede recargar y volverse a usar varias veces.

☐ La celda secundaria de plomo-ácido descargada tiene dos electrodos de sulfato de plomo y un electrolito que, en su mayor parte, es agua destilada. ☐ Cuando está descargada, la celda de plomo-ácido no satisface ninguno de los requisitos de una batería: sus electrodos no están hechos de metales distintos y su electrolito no atacará a ninguno de los electrodos. ☐ Cuando se aplica una corriente de carga eléctrica, un electrodo se transforma en plomo esponjoso y el otro en peróxido de plomo. Además, la mayor parte del agua del electrolito es substituida por ácido sulfúrico.

☐ Nunca deben sobrecargarse las celdas de plomo-ácido. ☐ La sobrecarga produce gases explosivos que son hidrógeno y oxígeno. También hace que el electrolito se concentre demasiado, lo cual daña los electrodos. ☐ Si una celda de plomo-ácido se sobrecarga el electrolito parece hervir debido a la ascensión de los gases hidrógeno y oxígeno.

preguntas de repaso

1. ¿Por qué suele llamarse *acumuladores* a las *celdas secundarias*?
2. ¿Cuál es la principal diferencia entre una *celda primaria* y una *celda secundaria*?
3. Desde el punto de vista de energía, ¿qué sucede cuando una celda secundaria se carga? ¿Qué ocurre cuando se descarga?
4. ¿Cumple una celda de plomo-ácido descargada con los requisitos de una batería? Explique por qué.
5. ¿Cuál es la composición de los electrodos y el electrolito de una celda de plomo-ácido descargada?
6. ¿Cuál es la composición de los electrodos y el electrolito de una celda de plomo-ácido completamente cargada?
7. ¿Cuál es la finalidad de los orificios de ventilación en baterías secundarias?
8. ¿Por qué es peligrosa una sobrecarga?
9. ¿Cómo puede detectarse visualmente una sobrecarga?
10. ¿Puede una sobrecarga dañar a la batería secundaria? Explique.



La energía suministrada por la corriente de carga es almacenada como energía química potencial entre el electrodo de plomo, el electrodo de peróxido de plomo y el ácido sulfúrico

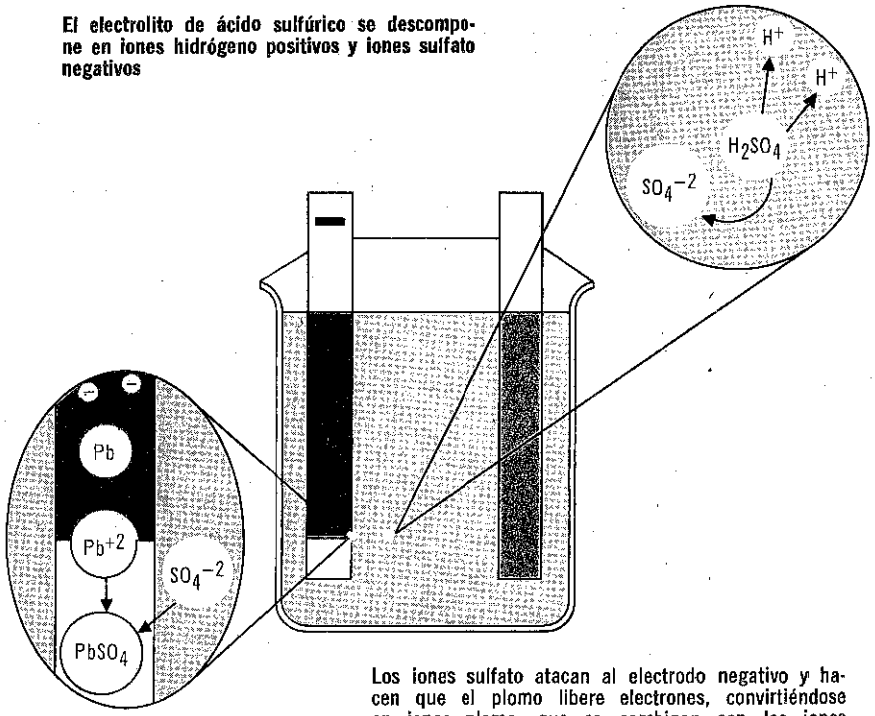
celda de plomo-ácido cargada

Después de que la celda de plomo-ácido se carga completamente, un electrodo queda formado por plomo esponjoso (Pb); el otro se compone de peróxido de plomo (PbO_2) y el electrolito es ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4). La celda tiene ahora las características de una batería como son dos electrodos diferentes y un electrolito que atacará por lo menos a uno de los electrodos. Nótese que en las explicaciones anteriores se dijo que, en tanto que los electrodos se *formaban,* éstos simplemente conducían la corriente de carga. No acumulaban cargas propias. En efecto, los átomos de los electrodos se mantienen neutros debido a la corriente de carga que fluye hacia la terminal negativa y sale de la terminal positiva. Por esta razón, la celda secundaria *no* almacena energía *eléctrica.* La energía que suministró la corriente de carga se conserva en forma de *energía química potencial* del electrodo de plomo, el electrodo de peróxido de plomo y el ácido sulfúrico.

cómo se produce un potencial negativo

En cuanto la corriente de carga deja de pasar a través de la celda de plomo-ácido, el ácido sulfúrico de la celda inicia una *reacción química inversa*, muy similar a lo que sucede en la celda húmeda primaria. El electrolito se separa en iones hidrógeno positivos (H^+) y iones sulfato negativos (SO_4^{-2}). Los iones sulfato negativos reaccionan con el electrodo negativo haciendo que el plomo esponjoso (Pb) libere dos electrones y se convierta en ion positivo (Pb^{+2}). El ion sulfato negativo se combina con el ion plomo positivo produciendo sulfato neutro de plomo ($PbSO_4$).

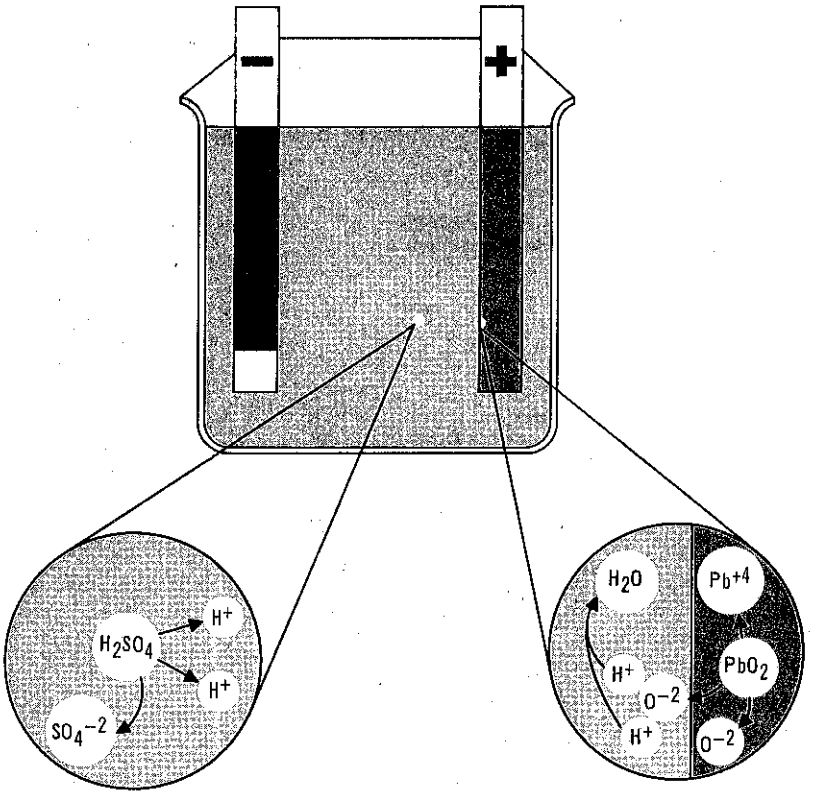
El electrolito de ácido sulfúrico se descompone en iones hidrógeno positivos y iones sulfato negativos



Los iones sulfato atacan al electrodo negativo y hacen que el plomo libere electrones, convirtiéndose en iones plomo, que se combinan con los iones sulfato para producir sulfato de plomo. Entonces, se produce un exceso de electrones libres para dar a la terminal negativa una carga negativa

En esencia, el electrodo negativo de plomo esponjoso comienza a transformarse nuevamente en sulfato de plomo, pero los dos electrones liberados por el ion plomo permanecen libres. La producción continuada de $PbSO_4$ no tarda en favorecer la acumulación de electrones en exceso en el electrodo negativo, para darle una carga negativa. Cuando se ha originado suficiente carga negativa, los iones sulfato son repelidos del electrodo para inhibir cualquier actividad química ulterior.

Los iones hidrógeno positivos que son liberados por el ácido sulfúrico atraen iones oxígeno negativos del electrodo positivo. Esto deja atrás iones Pb^{+4} que hacen que el electrodo desarrolle una carga positiva

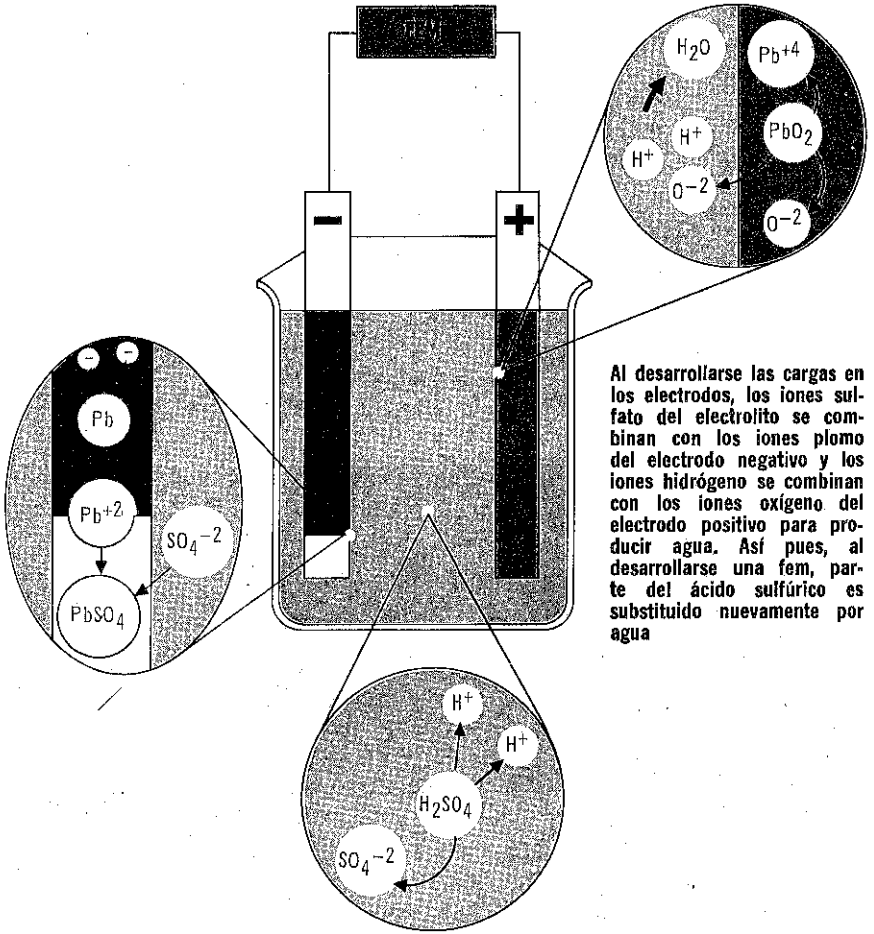


cómo se produce un potencial positivo

Los iones sulfato negativos (SO_4^{-2}) que hay en el electrolito atacan también al electrodo positivo. Cada molécula de peróxido de plomo (PbO_2) del electrodo positivo se divide en dos iones oxígeno negativos (O^{-2}) y un ion de plomo (Pb^{+4}). Los iones oxígeno son atraídos al electrolito por medio de los iones hidrógeno positivos (H^+). Esto deja Pb^{+4}; y cuando un número suficiente de iones oxígeno salen del electrodo, éste desarrolla una carga positiva. Cuando esta carga es lo suficientemente grande, los iones hidrógeno positivos son repelidos del electrodo positivo para inhibir cualquier actividad química ulterior.

reducción del electrólito

Al iniciarse la actividad electroquímica, el electrolito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) se divide en iones hidrógeno positivos (H^+) y iones sulfato negativos (SO_4^{-2}). Los iones sulfato se combinan con los iones plomo del electrodo negativo y producen suficiente sulfato de plomo, de manera que se origina una carga negativa. Los iones hidrógeno positivos atraen suficientes iones oxígeno negativos del electrodo positivo, de manera que se origina una carga positiva. Los iones hidrógeno y los iones oxígeno combinados producen agua (H_2O), de manera que, en el proceso de producir una diferencia de potencial entre los electrodos, parte del ácido sulfúrico se transforma de nuevo en agua. La actividad cesa cuando la celda de plomo-ácido origina una fem de aproximadamente 2.1 volts.

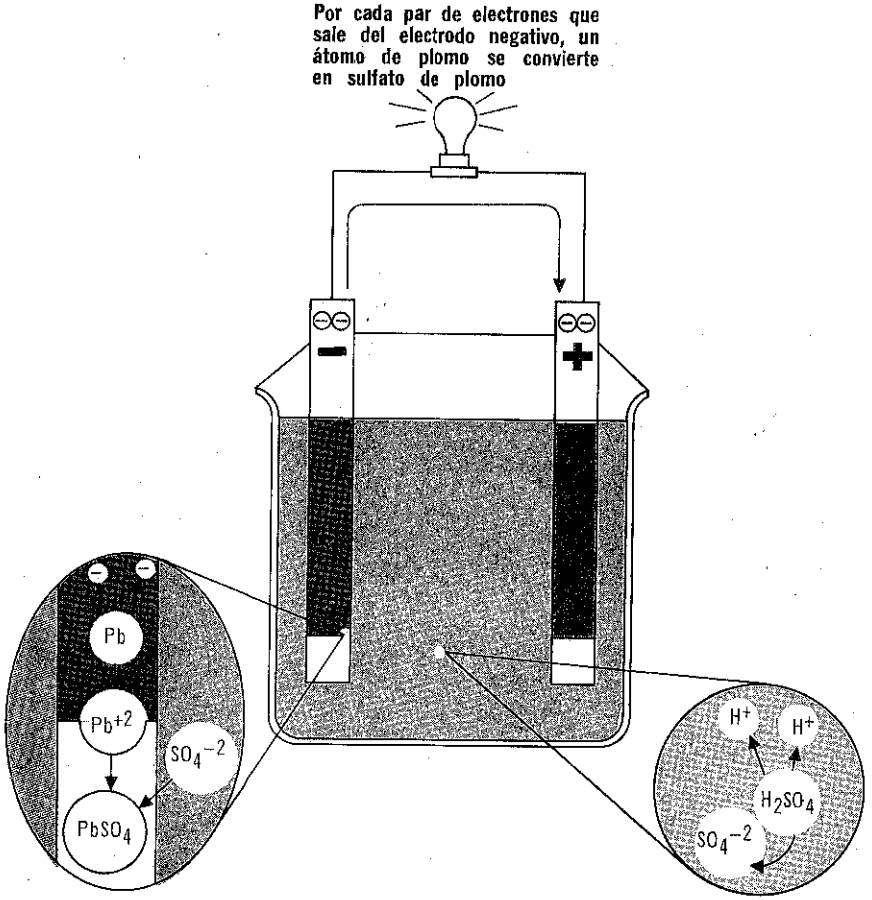


Al desarrollarse las cargas en los electrodos, los iones sulfato del electrolito se combinan con los iones plomo del electrodo negativo y los iones hidrógeno se combinan con los iones oxígeno del electrodo positivo para producir agua. Así pues, al desarrollarse una fem, parte del ácido sulfúrico es substituido nuevamente por agua

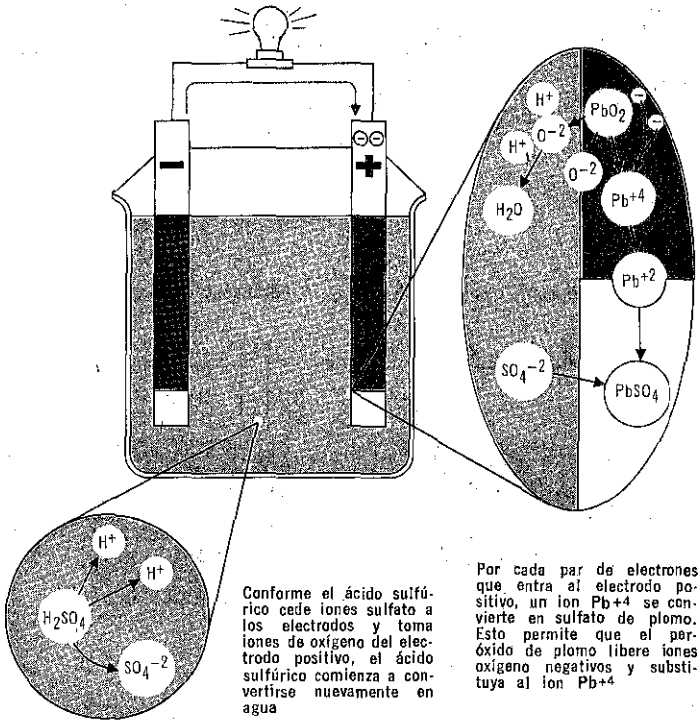
descarga de la celda de plomo-ácido

Cuando la celda de plomo-ácido se conecta a un circuito para alimentar corriente, la actividad química que ha producido la fem continúa para substituir a los electrones que salen de la terminal negativa y retirar los electrones que entran a la terminal positiva.

Al salir los electrones de la terminal negativa para ir a la carga, la carga en la terminal negativa tiende a disminuir, haciendo posible que los iones sulfato (SO_4^{-2}) del electrolito reaccionen nuevamente con el electrodo negativo. Los átomos de plomo del electrodo liberan electrones para substituir a los que han salido y convertirse en iones Pb^{+2}, los cuales se combinan con los iones sulfato para producir más sulfato de plomo ($PbSO_4$).



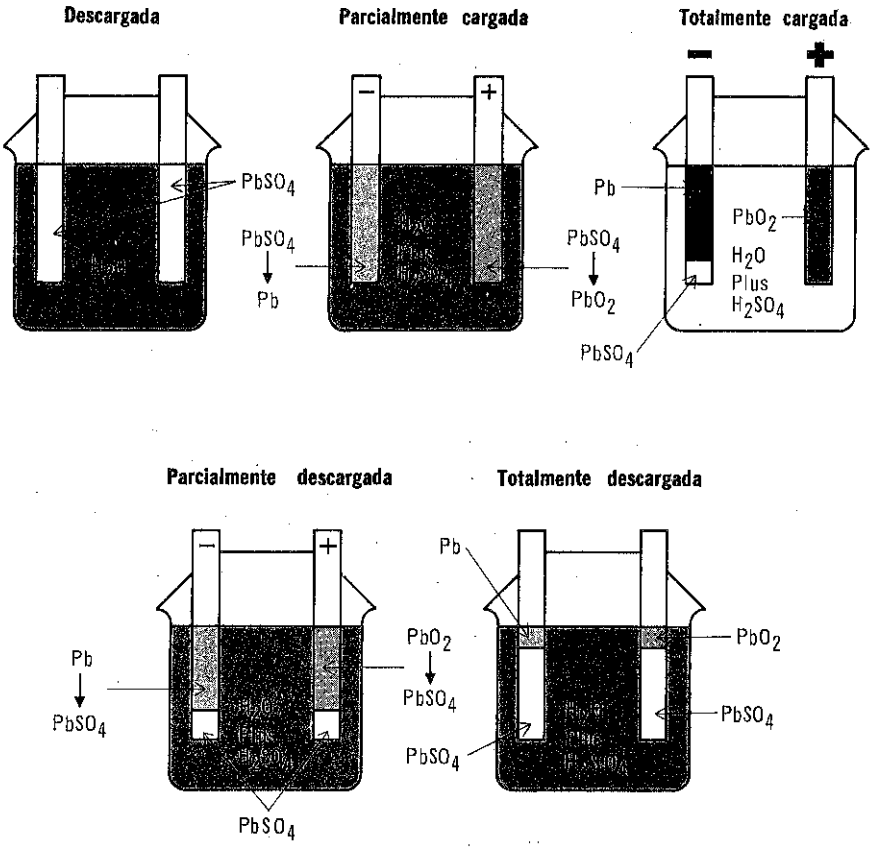
descarga de la celda de plomo-ácido (cont.)



Siempre que dos electrones salgan del electrodo negativo para ir a la carga, habrá dos electrones de la carga que son atraídos hacia el electrodo positivo. Estos electrones se combinan con un ion Pb^{+4}, transformándolo en ion Pb^{+2}. Entonces, el ion Pb^{+2} se combina con un ion sulfato negativo (SO_4^{-2}) del electrolito para depositar sulfato de plomo en el electrodo positivo. Pero, en el electrodo, la pérdida de un ion Pb^{+4} ocasiona la disociación de otro átomo de peróxido de plomo (PbO_2) que cede dos iones de oxígeno (O^{-2}) a los iones hidrógeno del electrolito. Esto deja otro ion Pb^{+4} que toma el lugar del que se ha transformado en Pb^{+2} y se combinó para producir sulfato de plomo.

En el proceso en el que la celda suministra corriente, el electrolito ha liberado más iones sulfato y absorbido más iones oxígeno, de manera que una mayor cantidad de ácido sulfúrico es substituido por agua.

Cuando está alimentando corriente, la fem de la celda de plomo-ácido disminuye en aproximadamente 2 volts.



celda descargada de plomo-ácido

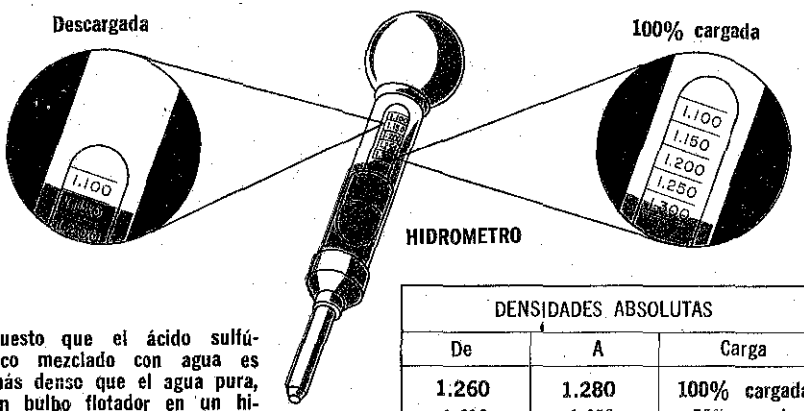
Obsérvese que al continuar suministrando corriente la celda de plomo-ácido, el plomo esponjoso (Pb) del electrodo negativo se transforma lentamente en sulfato de plomo ($PbSO_4$). De una manera similar, el electrodo positivo de peróxido de plomo (PbO_2) se convierte lentamente en sulfato de plomo. Y el ácido sulfúrico en el electrolito se transforma paulatinamente en agua. Al continuar descargando la celda, ambos electrodos se convierten en su mayor parte en sulfato de plomo y el electrolito contiene muy poco ácido sulfúrico. Por consiguiente, la celda ya no puede generar suficiente fem ni transmitir suficiente corriente para que se pueda usar y se dice que está *descargada.* Pero puede cargarse nuevamente hasta que los electrodos se convierten una vez más en plomo esponjoso (Pb) y peróxido de plomo (PbO_2) y el electrolito contiene más ácido sulfúrico. Trabajará nuevamente hasta ser descargada, pero puede usarse una y otra vez, si se *recarga periódicamente.* Se considera descargada una celda de plomo-ácido cuando su fem desciende a 1.75 volts.

densidad

Ya se ha explicado que la naturaleza química del electrolito depende de hecho del estado de carga en que se encuentra la celda. Cuando la celda queda totalmente cargada, el electrolito tiene un alto contenido de ácido sulfúrico, y cuando la celda está descargada, queda escaso ácido sulfúrico en el electrolito. Por lo tanto, se pueden hacer pruebas en el electrolito para determinar el estado de carga de la celda. Hacer esto por medios químicos sería difícil, pero se puede hacer simplemente midiendo la *densidad* del electrolito, la cual es el peso por unidad de volumen de una substancia, considerando generalmente el agua como referencia (peso específico).

No todos los materiales o líquidos tienen la misma *densidad*. El ácido sulfúrico es más denso que el agua como también lo será una mezcla de ácido sulfúrico y agua. Cuanta mayor concentración de ácido tenga el agua, más denso será el electrolito. La densidad puede comprobarse observando el punto de flotación de un hidrómetro en el electrolito. Flotará a un nivel más alto en un líquido denso que en un líquido ligero.

Por medio de una jeringa, se introduce algo del electrolito en el hidrómetro y un flotador registra la profundidad de flotación. La densidad de 1.280 indica que una batería está completamente cargada y un registro de 1.110 significa que la batería está descargada. La densidad del agua pura es 1.0. Sin embargo, debe tenerse presente que la densidad del ácido sulfúrico varía según la temperatura, de manera que su densidad es distinta a diferentes temperaturas. La mayor parte de los fabricantes efectúan las lecturas de sus celdas a 37° C (80° F). Un buen hidrómetro incluye un termómetro que sirve para comprobar la temperatura del electrolito y hacer ajustes de compensación por cada 5° C de desviación (10° F), según sea el caso.



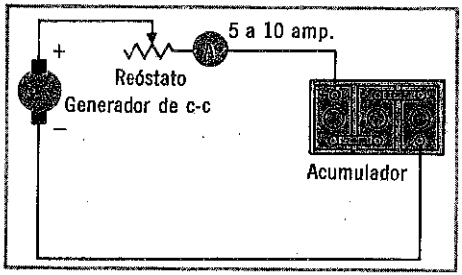
Puesto que el ácido sulfúrico mezclado con agua es más denso que el agua pura, un bulbo flotador en un hidrómetro sirve para comprobar la cantidad de ácido sulfúrico que hay en el electrolito y determinar el estado de carga de la celda. Esta es la prueba de densidad

DENSIDADES ABSOLUTAS		
De	A	Carga
1.260	**1.280**	**100% cargada**
1.230	1.250	75% cargada
1.200	1.220	50% cargada
1.170	1.190	25% cargada
1.140	1.160	Muy poca capacidad útil
1.110	**1.130**	**Descargada**

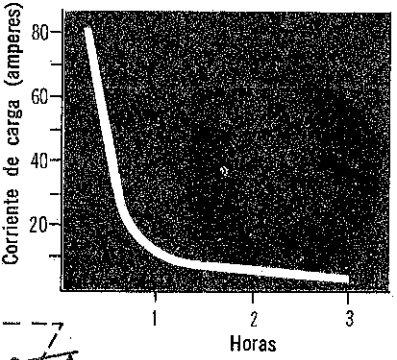
métodos de carga

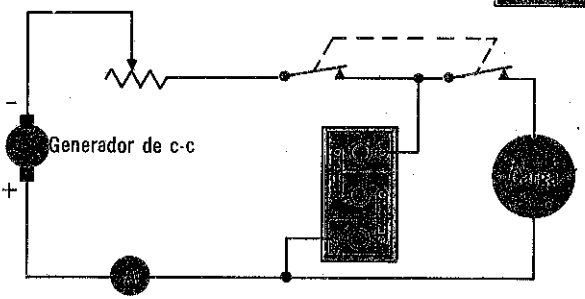
Los acumuladores se pueden cargar de varias maneras. Los dos métodos básicos son carga por *corriente constante* y carga por *voltaje constante*. Cualquiera de los dos métodos se puede usar para dar una *carga rápida, carga lenta* o *carga de flotación*. Independientemente del método que se ponga en práctica, la corriente de carga debe ser continua. El método de carga lenta con corriente constante es el más adecuado para cargar una batería, pero tarda más tiempo: de 16 a 24 horas, con una corriente de carga de unos 10 amperes. La carga rápida de voltaje constante es el método más breve, pero tiene tendencia de dañar a las baterías que pudieran no estar en las mejores condiciones. La corriente alta acelera la actividad química que puede deteriorar los electrodos y hace hervir el agua, haciendo que se concentre demasiado el electrolito. Este tipo de carga comienza con una corriente de 50 a 100 amperes, que disminuye al cargar la batería. Por tal razón, este método también se llama *carga decreciente*. En una hora se puede dar una carga moderada por este método, pero se necesitan varias horas para proporcionar una carga completa. Se usa el cargador de flotación para dar una pequeña corriente a una batería, cuando ésta se está usando y así se mantiene a la batería totalmente cargada mientras está funcionando. Sin embargo, esto puede ocasionar una sobrecarga en la batería y dañarla si la carga no se controla con precisión.

Un cargador de corriente constante usa una fuente de voltaje ligeramente más alto que el voltaje de la batería para obtener la corriente de carga apropiada



Un cargador de voltaje constante aplica voltaje constante c-c a la batería, originando una corriente de carga inicial muy alta

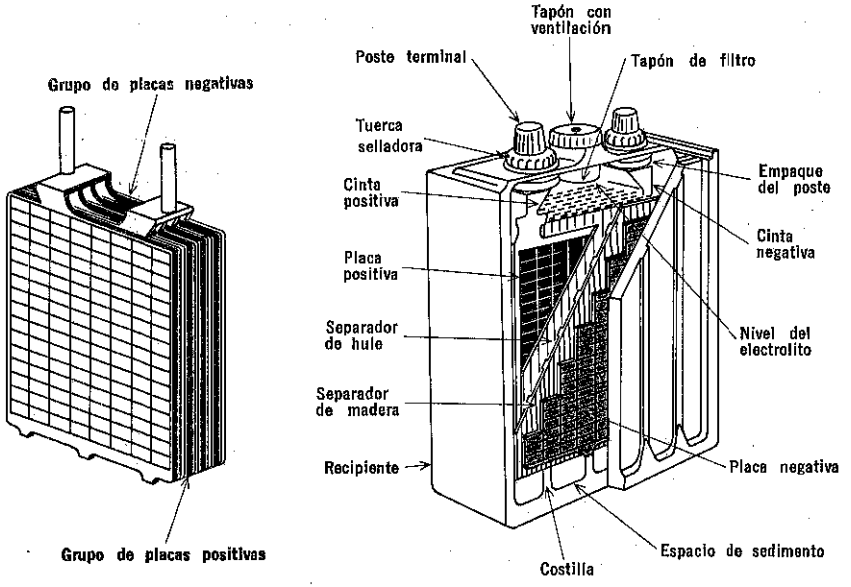




Un cargador de flotación transmite sólo una pequeña corriente para mantener a la batería cargada durante su funcionamiento

estructura

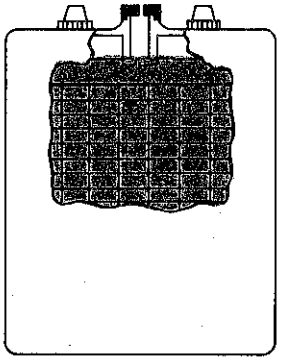
Según se ha estudiado al tratar sobre la celda húmeda primaria, la cantidad de corriente que puede transmitir una celda depende del área de la superficie de sus electrodos. Para que los electrodos de una celda de plomo-ácido tengan un área efectiva amplia, de manera que puedan producir grandes corrientes, cada elemento del electrodo está hecho de una serie de *placas*. Además, las placas del electrodo negativo y las del electrodo positivo están *entrelazadas,* de manera que las placas negativas y las positivas estén lo suficientemente próximas para que la batería funcione con eficiencia. Pequeños separadores de materiales porosos no conductores, mantienen separadas a las placas para evitar que entren en contacto.



El grupo de placas para cada electrodo está conectado por medio de un *puente* de plomo, unido a la terminal correspondiente. Luego, los grupos de placas entrelazados, se introducen generalmente en un recipiente moldeado y resistente al ácido. Como los materiales de los electrodos están hechos de plomo, son demasiado suaves para mantenerse rígidos. En consecuencia, las placas son unas rejillas con orificios, los cuales sirven para sostener los materiales de los electrodos. Generalmente se usa una aleación de plomo-antimonio para la estructura de la rejilla. En la parte superior de la celda hay un orificio con tapón, mediante el cual es posible comprobar el nivel del electrolito, así como agregar agua cuando sea necesario. El tapón generalmente tiene un orificio de ventilación para que puedan escapar los gases

desventajas

Se sabe que el funcionamiento de la celda de plomo-ácido depende de la capacidad que tiene el sulfato de plomo de los electrodos para transformarse en plomo y peróxido de plomo durante el ciclo de carga. Con una batería bien cuidada y *mantenida* siempre cargada, esto no es un problema; pero cuando se deja que la batería permanezca parcialmente descargada durante un periodo prolongado, el sulfato de plomo tiende a volverse duro y quebradizo; este fenómeno se conoce como *sulfatación*. El área sulfatada de un electrodo no reacciona debidamente con el electrolito, de manera que la capacidad de corriente de la celda disminuye. El proceso de sulfatación puede continuar hasta que se ha perdido tal proporción del área de los electrodos, que la batería se vuelve demasiado débil e inútil. Además, el sulfato es quebradizo y puede desprenderse del electrodo. Generalmente cae en el fondo formando un área de *sedimento,* pero puede alojarse entre las placas de los electrodos, ocasionando un corto en la celda.



Para reducir la sulfatación, la celda de plomo-ácido debe mantenerse cargada y el nivel del electrolito debe mantenerse por lo menos a 9 mm arriba de las placas

Otro problema con esta celda resulta de la actividad de la electrólisis durante la carga. Téngase presente que, cuando se sobrecarga una celda, el exceso de iones hidrógeno y iones oxígeno se convierte en gases que escapan, reduciéndose el nivel de agua del electrolito. Esto sucede aun durante la carga normal; pero en menor grado. Finalmente, la cantidad de agua se puede reducir a un punto en que el nivel del electrolito sea demasiado bajo y el contenido relativo de ácido sulfúrico sea excesivo. Esto hace que las áreas expuestas de los electrodos se sulfaten más rápidamente y el electrolito, excesivamente fuerte, atacará al miembro de soporte de la celda, el cual no debe reaccionar con la solución. El nivel del electrolito debe revisarse periódicamente y agregarse agua destilada para mantener el nivel aproximadamente a un centímetro por encima de las placas de los electrodos.

En este tipo de celda, el electrolito también puede congelarse en tiempo de frío, especialmente si la celda no está totalmente cargada y la densidad del electrolito es baja. La razón es que, en su mayor parte, el electrolito es agua, la cual se congela antes que el ácido sulfúrico. Y cuando el agua se congela, se expande haciendo que se deformen las placas de los electrodos.

resumen

☐ Cuando se quita la corriente de carga de la celda de plomo-ácido, ocurre una actividad química inversa a la que tiene lugar durante la carga. Esta acción química hace que se produzca un potencial positivo en un electrodo y un potencial negativo en el otro. ☐ Cuando está totalmente cargada, la celda de plomo-ácido tiene un voltaje de salida sin carga de aproximadamente 2.1 volts. El voltaje de salida se reduce a unos 2 volts cuando la celda está pasando corriente. ☐ Se considera que la celda de plomo-ácido está descargada cuando su voltaje de salida cae a 1.75 volts.

☐ El estado de la carga de una celda se puede determinar midiendo la densidad del electrolito con un hidrómetro. ☐ Una celda completamente cargada tiene una densidad de 1.280; una celda descargada, de 1.110.

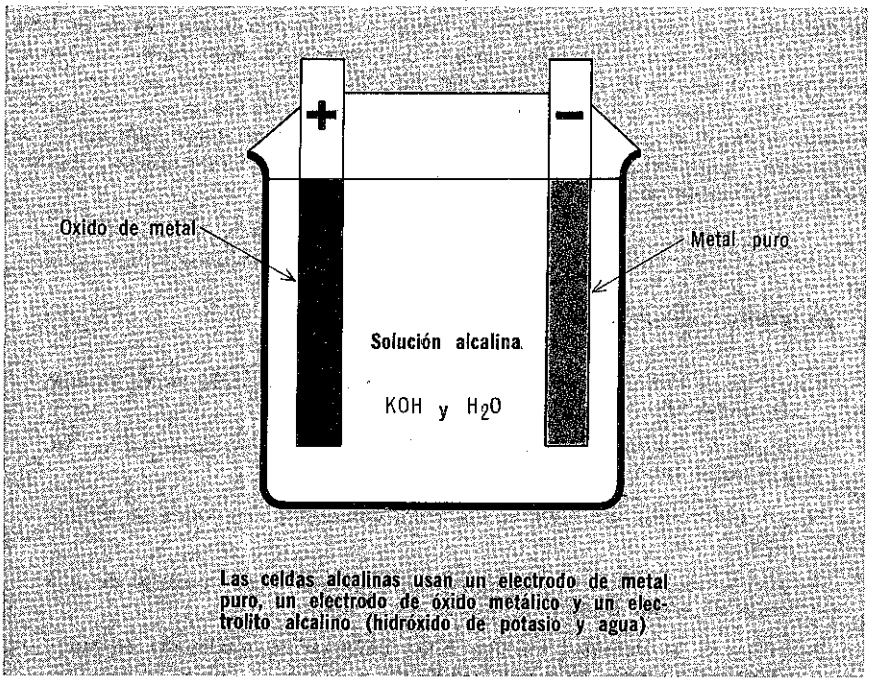
☐ Los acumuladores se pueden cargar con cargadores de corriente constante o de voltaje constante. Ambos tipos de cargador se pueden usar para proporcionar una carga rápida, lenta o de flotación. El método de carga a corriente constante con carga lenta es el más seguro, pero el más prolongado. ☐ El método de carga rápida con voltaje constante es el más breve, pero puede dañar las baterías que no estén en buenas condiciones. Este método también se llama carga decreciente, debido a que la corriente de carga disminuye al cargarse la batería. ☐ La sulfatación ocurre cuando una batería de plomo-ácido permanece parcialmente descargada durante un largo periodo. Efectivamente, la sulfatación hace que se pierda parte del electrodo.

preguntas de repaso

1. ¿Cuál es el voltaje de salida de una celda plomo-ácido en el instante de quitar la corriente de carga? Explique.
2. Explique brevemente la forma en que se origina un potencial en los electrodos de una celda plomo-ácido.
3. ¿A qué voltaje de salida se considera descargada una celda de plomo-ácido?
4. ¿Cómo se relaciona la densidad del electrolito con la carga de una celda de plomo-ácido?
5. ¿Cuál es la densidad en una celda plomo-ácido totalmente cargada? ¿Cuál es en una celda descargada?
6. ¿Se puede usar c-a para cargar un acumulador?
7. ¿Qué es *carga decreciente*?
8. ¿Qué es *sulfatación*?
9. ¿Por qué debe agregarse periódicamente agua destilada a un acumulador de plomo-ácido?
10. ¿Por qué es una buena práctica el mantener los acumuladores totalmente cargados en todo momento?

celda alcalina secundaria

La celda *alcalina* es mucho más costosa que la celda de plomo-ácido, pero continúa en uso, debido a que requiere mucha menor atención que la celda de plomo-ácido y porque tiene una vida útil mucho más larga. Además, los electrodos están hechos de metales ligeros, de manera que la celda misma no es tan pesada como la celda de plomo-ácido. Según se estudiará posteriormente, el electrolito de una celda alcalina no cambia químicamente durante la carga y la descarga, de manera que no tiende a congelarse tanto como el electrolito de una celda de plomo-ácido. Debido a esta propiedad, la densidad de la celda alcalina no cambia, de manera que no se puede tomar como método para comprobar el estado de la carga de la batería.



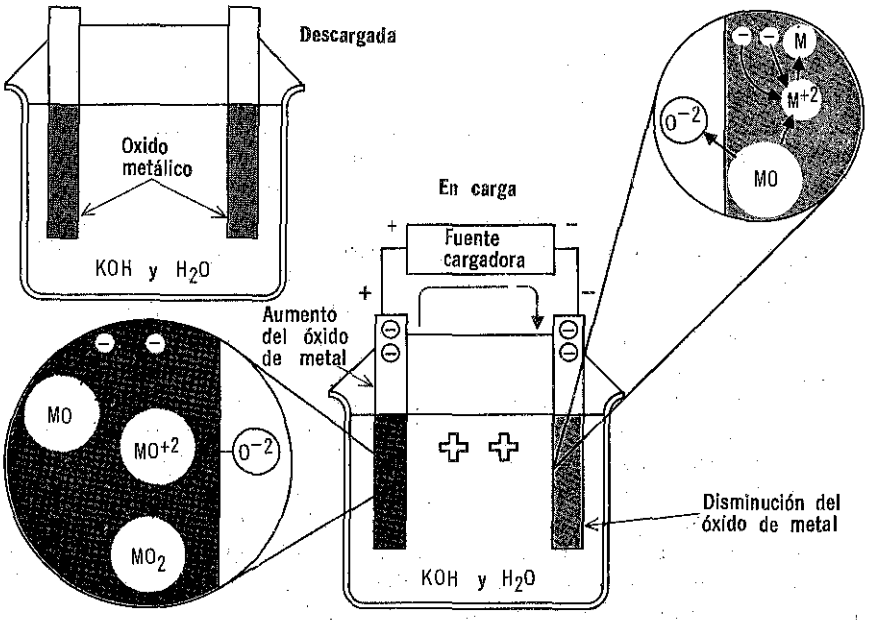
Las celdas alcalinas usan un electrodo de metal puro, un electrodo de óxido metálico y un electrolito alcalino (hidróxido de potasio y agua)

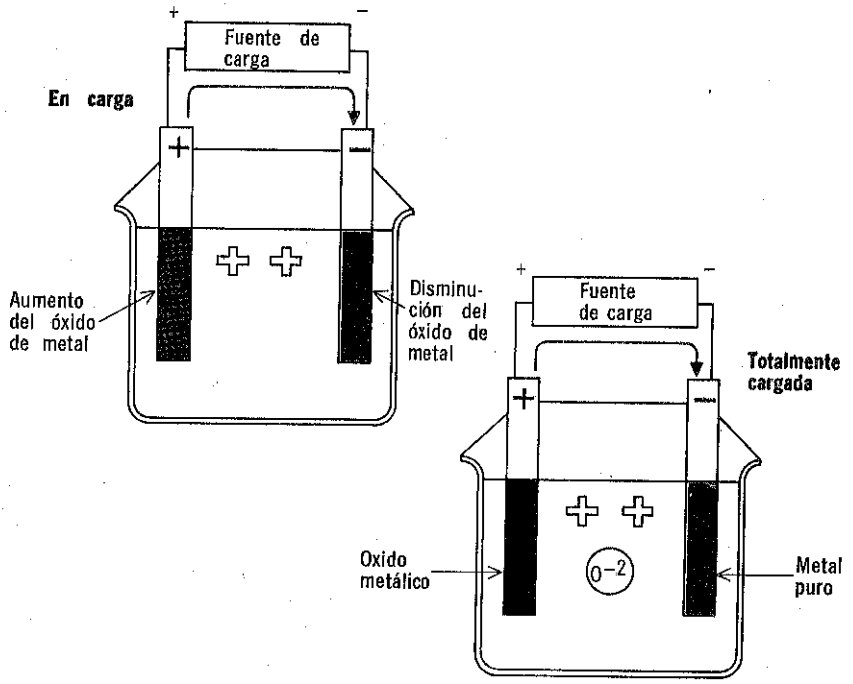
Básicamente, la celda alcalina debe su nombre a que su electrolito es una solución alcalina, no ácida. Este es simplemente otro tipo de substancia química que reacciona con los metales en forma diferente de como lo hace el ácido. Los tipos más comunes de celdas alcalinas son la celda de óxidos de níquel y hierro, inventada por Thomas A. Edisón, la celda de níquel-cadmio y la de plata-cinc. Cada una de estas celdas consta básicamente de un electrodo de metal *puro,* un electrodo de óxido metálico y un electrolito *alcalino* de hidróxido de potasio (KOH) mezclado con agua destilada (H_2O).

carga

Básicamente, la celda alcalina funciona en forma similar a la ácida, ya que los materiales de los electrodos cambian durante los ciclos de carga y descarga. Sin embargo, el electrolito no cambia. Todas las celdas alcalinas funcionan en forma similar.

Antes que nada, conviene saber que el óxido de metal es el mismo metal combinado con oxígeno. Cuanto mayor sea el número de átomos de oxígeno con los que se combina, mayor será el número de moléculas de óxido que habrá y viceversa. Cuando la celda alcalina está descargada, ambos electrodos están formados por óxido de metal. Como los electrodos no son diferentes, no producen una fem, pero cuando se conecta una fuente de carga a la celda, la fem de la fuente produce la electrólisis del electrolito. El electrolito se separa en un número igual de iones positivos y negativos. Sólo los iones negativos —que son iones oxígeno— reaccionan con los electrodos, de manera que se puede no tomar en cuenta al resto de la solución. Los iones oxígeno negativos son repelidos del electrodo negativo y atraídos hacia el electrodo positivo debido a la polaridad de la fuente de carga. Cuando un ion oxígeno llega al electrodo positivo, repele electrones de la molécula de óxido metálico, haciéndola positiva. Entonces el ion oxígeno negativo es atraído hacia el ion de óxido metálico y se combinan para hacer más óxido del electrodo. Los electrones liberados por las moléculas de óxido son atraídos del electrodo por la fuente de carga, para producir parte de la corriente de carga.





carga (cont.)

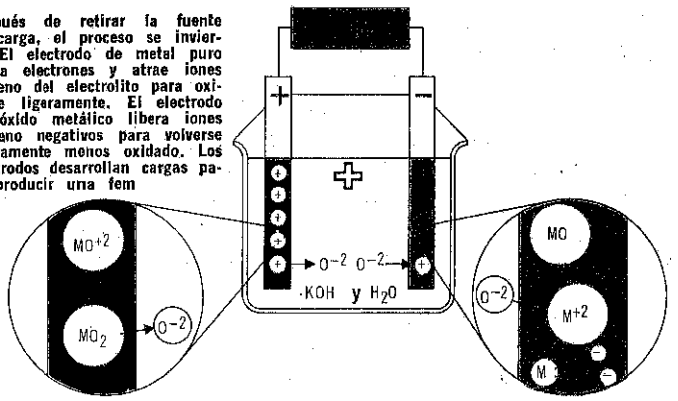
Cuando un ion oxígeno se combina con el electrodo positivo, el electrolito se desequilibra eléctricamente, adquiriendo una carga positiva. La atracción positiva del electrolito hace que las moléculas de óxido metálico del electrodo negativo se separen en iones metálicos positivos y iones oxígeno negativos. Entonces, la solución atrae a los iones oxígeno hacia ella. Además, los iones positivos de metal en el electrodo atraen electrones de la fuente de carga para constituir el resto de la corriente de carga. Como el electrodo negativo libera un ion oxígeno, se hace menos óxido. En este proceso, el electrodo positivo continúa tomando iones óxígeno del electrolito para formar óxido y el electrodo negativo sigue desprendiendo iones oxígeno para dejar de ser óxido. El electrodo positivo libera electrones y el electrodo negativo atrae electrones para formar la corriente de carga. Esto se repite hasta que el electrodo negativo ya no tiene átomos de oxígeno y se convierte en metal puro y el electrodo positivo queda completamente oxidado: entonces, la celda estará completamente cargada.

Nótese que, para cada ion oxígeno que el electrolito cede al electrodo positivo, del electrodo negativo se recibe otro que lo substituye. Por lo tanto, la naturaleza del electrolito *nunca cambia.*

cómo se produce una fem

Probablemente ya se habrá notado que, durante el ciclo de carga, se producen iones positivos en ambos electrodos. Pero en el electrodo positivo, los iones positivos se neutralizan al combinarse con los iones oxígeno negativos. En el electrodo negativo, los iones positivos se neutralizaban con los electrones de la fuente de carga. Por lo tanto, durante el periodo de carga, la celda alcalina no produce una fem propia. Almacena energía química, igual que la celda de plomo-ácido, pero en cuanto la fuente de carga se retira, la reacción química *se invierte*. Los iones oxígeno negativos en el electrolito ya no son repelidos por el electrodo de metal puro. En cambio, reaccionan con el electrodo y hacen que los átomos de metal liberen electrones. Entonces, los iones positivos de metal atraen a los iones oxígeno negativos, combinándose con ellos, para producir una pequeña cantidad de óxido metálico neutro. Los electrones que son liberados, se acumulan en el electrodo de metal puro para darle una carga negativa. Cuando esta carga negativa es lo suficientemente grande, los iones oxígeno en el electrolito son repelidos para evitar oxidación ulterior del electrodo.

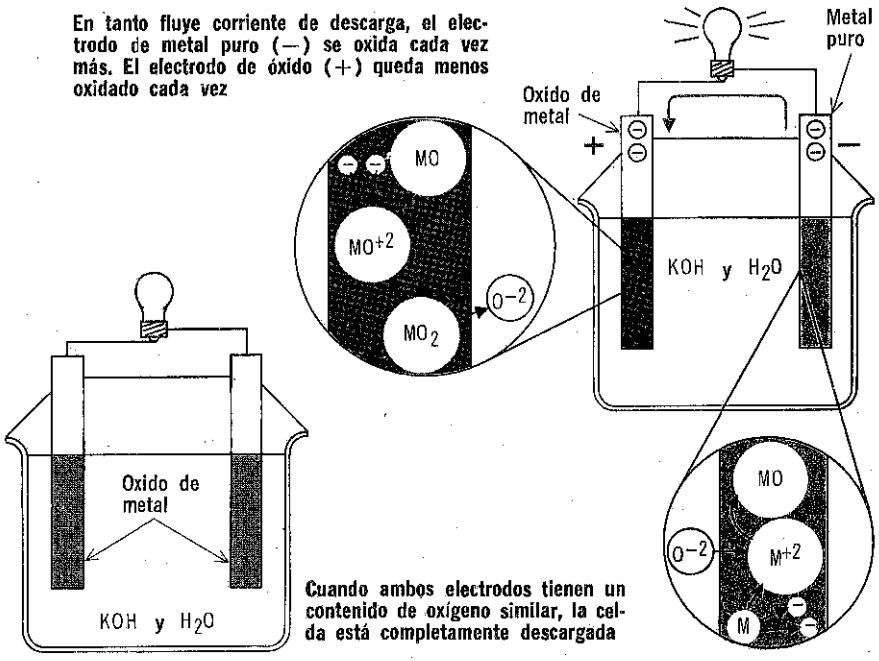
Como se han sacado iones oxígeno negativos del electrolito, éste adquiere una carga positiva. La atracción positiva del electrolito hace que algunas de las moléculas del electrodo de óxido de metal se separen en iones positivos de óxido metálico y iones oxígeno negativos, los cuales son atraídos hacia el electrolito; esto continúa hasta que el electrolito se vuelve nuevamente neutro. Los iones positivos que han quedado en el óxido metálico originan una carga positiva. La diferencia de potencial existente entre los dos electrodos es la fem de la celda. En el proceso en que se produce una fem, el electrodo de metal puro (−) se oxida ligeramente y el electrodo de óxido metálico (+) se vuelve menos oxidado. Sin embargo, como los iones oxígeno que fueron depositados en el electrodo negativo fueron substituidos por los iones oxígeno liberados en el electrodo positivo, el electrolito no cambia.



Después de retirar la fuente de carga, el proceso se invierte. El electrodo de metal puro libera electrones y atrae iones oxígeno del electrolito para oxidarse ligeramente. El electrodo de óxido metálico libera iones oxígeno negativos para volverse ligeramente menos oxidado. Los electrodos desarrollan cargas para producir una fem

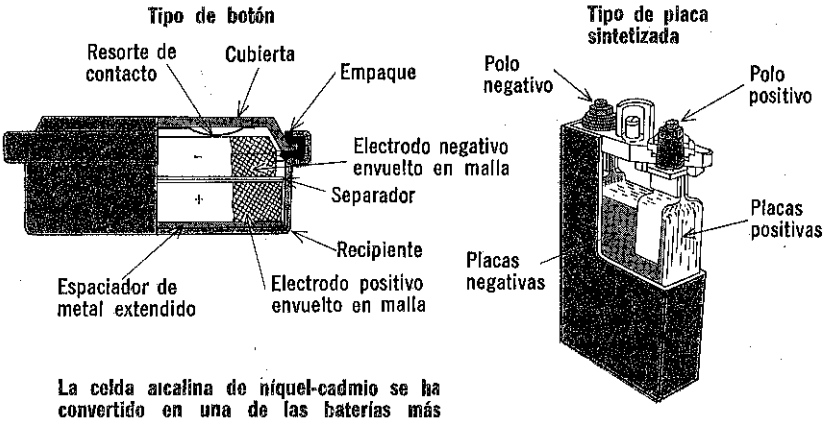
ciclo de descarga

Esencialmente, cuando la celda alcalina se descarga, simplemente continúa el proceso que produjo la fem. Sin paso de corriente, la actividad cesa, debido a que la carga negativa en el electrodo de metal puro evita toda oxidación ulterior. Pero cuando se conecta una carga a la celda y hay flujo de corriente, los electrones salen del electrodo negativo y entran en el electrodo positivo. El número de carga en los electrodos, disminuye. Pero esto permite nuevamente que iones oxígeno negativos del



electrolito se combinen con átomos metálicos del electrodo negativo, para liberar más electrones que substituyan a los que se han incorporado al flujo de corriente. Y, como resultado, el electrodo de óxido metálico libera iones oxígeno que substituyen a los que ha liberado el electrolito; por lo tanto, se originan nuevos iones metálicos positivos y iones oxígeno negativos, los cuales substituyen a los que ha neutralizado el flujo de corriente. Debido a esto, continúa pasando una corriente de descarga, el electrodo de metal puro comienza a transformarse cada vez más en óxido metálico y el electrodo positivo se vuelve cada vez menos óxido metálico.

Cuando la celda está descargada, ambos electrodos tienen la misma cantidad de oxígeno y la celda está demasiado débil para funcionar y se debe cargar nuevamente. Pero, en todo el proceso, el electrolito no ha cambiado; simplemente ha intercambiado iones oxígeno entre los electrodos.



La celda alcalina de níquel-cadmio se ha convertido en una de las baterías más usadas, especialmente en equipo portátil

celdas alcalinas típicas

La celda alcalina más antigua que se sigue usando es la celda de níquel-hierro, llamada generalmente *celda de Edison*. En ella se usa un electrodo positivo de bióxido de níquel (NiO_2) y un electrodo negativo de hierro puro ionizado (Fe). Durante el ciclo de descarga, el electrodo negativo se transforma en óxido de hierro (FeO_3) y el electrodo positivo en óxido de níquel (Ni_3O_4). Cuando está totalmente cargada, esta celda produce aproximadamente 1.37 volts, que se reduce aproximadamente a 1 volt cuando se considera la celda descargada. La celda de Edison se usa principalmente en señales de ferrocarriles y telégrafos así como en lámparas portátiles.

Otra celda alcalina que se usa cada vez más es la de *níquel-cadmio*. Fue inventada en Suecia a principios de siglo, pero construirla no fue práctico, sino hasta hace relativamente poco tiempo. Consta de un electrodo positivo de dióxido de níquel (NiO_2) y un electrodo negativo de cadmio puro (Cd) que se transforman respectivamente en óxido de níquel (Ni_3O_4) y óxido de cadmio (CdO_2) durante la descarga. La celda produce un voltaje en circuito cerrado de aproximadamente 1.2 volts, la cual permanece relativamente invariable durante el ciclo de descarga. Estas celdas se pueden construir de tamaño pequeño y de sólida consistencia se usan mucho en equipo portátil pequeño.

Un reciente progreso lo constituye la celda de plata-cinc que tiene un electrodo positivo de óxido de plata (Ag_2O) y un electrodo negativo de cinc puro (Zn). Durante el ciclo de descarga, el electrodo positivo pierde gran parte de su contenido de óxido y comienza a cambiar a plata pura (Ag); el electrodo negativo comienza a transformarse en óxido de cinc (ZnO). Una celda de plata-cinc totalmente cargada transmite una fem de circuito cerrado de aproximadamente 1.86 volts, que desciende a 1.6 volts cuando la celda está descargada.

resumen

☐ Las celdas alcalinas secundarias contienen soluciones alcalinas como electrolitos, en lugar de ácidos. ☐ Las celdas alcalinas requieren menos atención y tienen vidas útiles más largas que las celdas de plomo-ácido; sin embargo, son mucho más costosas. ☐ La densidad del electrolito no se puede usar para determinar el estado de carga de una celda alcalina. Esto se debe a que el electrolito no cambia químicamente durante los procesos de carga y descarga.

☐ Una celda alcalina descargada tiene dos electrodos de óxido metálico y un electrolito alcalino. ☐ La corriente de carga produce actividad química dentro de la celda, que convierte a un electrodo en metal puro, en tanto que al otro lo oxida más. ☐ Cuando se retira la fuente de carga, la actividad química en la celda se invierte y produce una carga positiva en un electrodo y carga negativa en el otro.

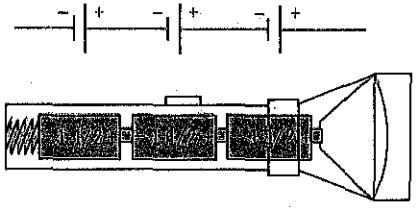
☐ Un tipo de celda alcalina usa un electrodo positivo de dióxido de níquel y un electrodo negativo de hierro puro. A esta celda níquel-hierro se le llama también celda de Edison. ☐ Cuando está totalmente cargada, la celda de Edison tiene un voltaje de salida de aproximadamente 1.37 volts. ☐ La celda de níquel-cadmio tiene un electrodo positivo de dióxido de níquel y un electrodo negativo de cadmio puro. Al cargarse, produce un voltaje de salida de aproximadamente 1.2 volts. ☐ La celda de plata-cinc tiene un electrodo positivo de óxido de plata y uno negativo de cinc puro; cuando está totalmente cargada su voltaje de salida es de aproximadamente 1.86 volts. ☐ El electrolito de la mayor parte de las celdas alcalinas es hidróxido de potasio mezclado con agua destilada.

preguntas de repaso

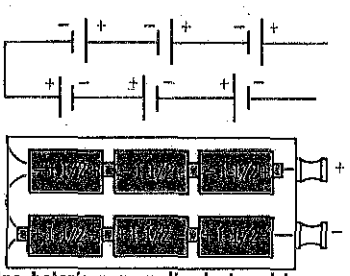
1. En una celda alcalina secundaria, ¿existe alguna relación entre la densidad del electrolito y el estado de carga de la celda?
2. ¿Cuáles son las ventajas que tiene una celda alcalina sobre una celda de plomo-ácido?
3. ¿Está cargada o descargada una celda alcalina cuando ambos electrodos son óxidos metálicos?
4. ¿Cuál es la función del electrolito en una celda alcalina?
5. ¿Qué es una *celda de Edison*?
6. En una celda alcalina cargada, ¿es positivo o negativo el electrodo de metal puro?
7. ¿Qué efecto tiene la corriente de carga sobre el electrolito de una celda alcalina?
8. ¿Por qué el electrolito de una celda alcalina no tiende a congelarse tanto como el de una celda de plomo-ácido?
9. ¿Qué es un *óxido metálico*?
10. ¿Qué electrolito se usa en la mayor parte de las celdas alcalinas?

baterías de celdas múltiples

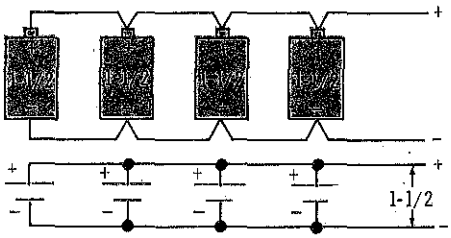
Se ha explicado anteriormente que, aunque los términos *pila* y *batería* se usan actualmente en forma indistinta, en una época el término batería se usaba sólo para designar una combinación de celdas. La mayor parte de las aplicaciones, el voltaje y la corriente que puede producir una sola celda no son suficientes, de manera que muchas baterías disponen de *combinación de celdas*. Cuando se necesita un *voltaje más alto*, las celdas se conectan en *serie* de manera que sus fem se suman. Las celdas se pueden conectar dentro de la batería o combinarse baterías separadas para obtener mayor voltaje. Todas las *polaridades* tienen que estar en la *misma dirección*; de lo contrario, los voltajes se restarían. En una combinación en serie, la misma corriente pasa por todas las celdas, de manera que en este tipo de pila no aumenta la capacidad de corriente. En efecto, la corriente total que puede producir la batería será la que corresponde a la celda más débil.



En muchas linternas se conectan en serie tres pilas de 1.5 volts para prender un foco de 4.5 volts.



Una batería para radio de transistores contiene seis celdas de 1.5 volts conectadas en serie

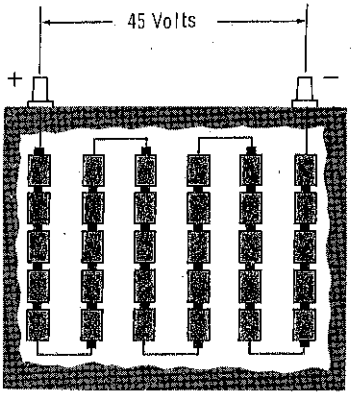


Cuatro pilas de 1.5 volts conectadas en paralelo producirán una fem de 1.5 volts con una capacidad de corriente cuatro veces mayor que la de una sola celda

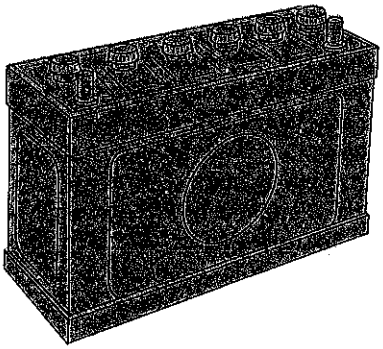
Para aumentar la *capacidad de corriente*, las celdas deben conectarse en paralelo. Entonces cada celda suministrará su propia corriente y la capacidad total de corriente será igual a la suma de la de todas las celdas. También en este caso, las celdas deben conectarse con la misma polaridad. De lo contrario, unas celdas transmitirán corriente a otras y la combinación estará en corto circuito. Además, todas las celdas deben tener la misma capacidad de voltaje, pues de otra manera, la que tenga mayor voltaje transmitirá corriente a la que lo tenga menor.

Conectando celdas en combinaciones en *serie y paralelo*, se pueden obtener mayores capacidades de voltaje y corriente.

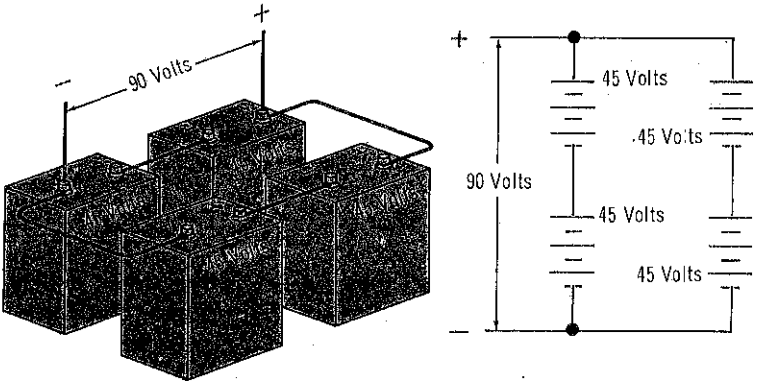
tipos de baterías



Una batería de 45 volts tiene 30 celdas de 1.5 volts conectadas en serie



Una batería de automóvil de 1.2 volts tiene seis celdas de plomo-ácido de 2 volts conectadas en serie

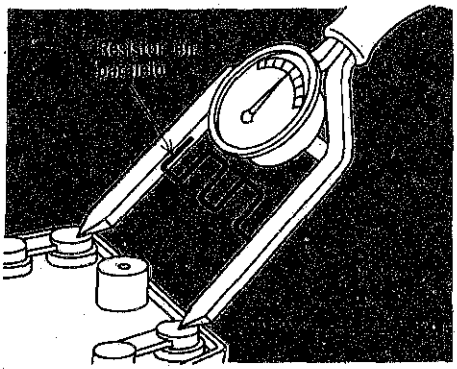


Cuatro baterías de 45 volts están conectadas en una combinación en serie y paralelo para producir una fuente de 90 volts y alta corriente

voltajes nominales

Ya se ha estudiado que la salida de voltaje de una batería depende solamente de los materiales que se utilicen como electrodos y electrolitos. La cantidad de material que se use, o bien el tamaño físico de la batería no afecta la capacidad de voltaje de ésta. Cada combinación específica de productos químicos produce una fem específica. La única forma en que la tensión nominal puede aumentar es por medio de la conexión en serie de un mayor número de celdas.

Las baterías se clasifican según su *voltaje sin carga,* o sea, la fuerza electromotriz producida por la batería cuando *no* transmite corriente. Cuando *sí* está suministrando corriente, el voltaje de la batería se *reduce* ligeramente —aproximadamente a 0.1 volt por celda. El *voltaje* con carga desciende aún más en el caso de que las baterías estén gastadas. Esto se explica en la página 6-54. Por esta razón, si se prueba una batería cuando no suministra corriente, el voltaje obtenido carece de significación. Debe derivarse la batería, de manera que transmita su corriente nominal, para observar la magnitud de la caída de voltaje. Si la caída de voltaje es muy grande, la batera está desgastada. Hay *probadores de voltaje con resistencia en derivación* que se usan para probar acumuladores en esta forma



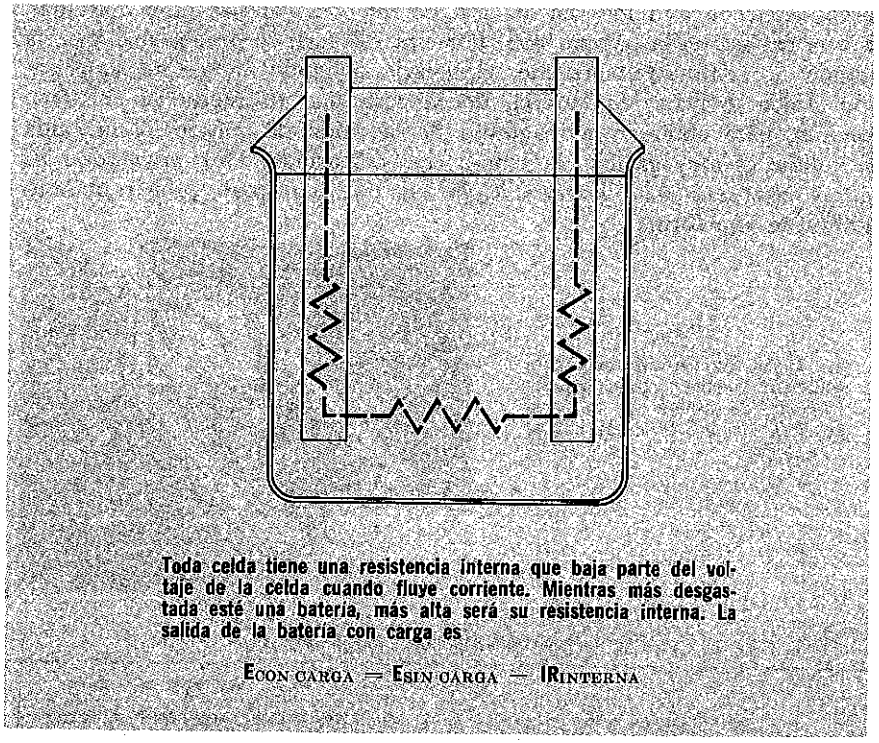
El resistor en derivación de este voltímetro permite el paso de altas corrientes de manera que se puede comprobar el voltaje de la batería con carga

VOLTAJES NOMINALES DE CELDAS TÍPICAS

Tipo de celda	Voltajes nominales		
	Sin carga	Con carga	Nivel de descarga
Celda húmeda primaria de cobre-cinc-ácido sulfúrico	1.08	1.008	aprox. 0.8
Celda húmeda primaria de carbono-cinc-ácido crómico	2.0	1.9	aprox. 1.7
Celda seca primaria de carbono-cinc-cloruro de amonio (celda Leclanché)	1.5	1.4	aprox. 1.2
Celda seca primaria de mercurio-cinc-hidróxido de potasio (celda de mercurio)	1.34	1.31 a 1.24	aprox. 1.0
Acumulador de plomo-ácido	2.1	2.0	aprox. 1.75
Acumulador alcalino de níquel-hierro (celda Edison)	1.37	1.3	aprox. 1.0
Acumulador alcalino de níquel-cadmio	1.3	1.2	aprox. 1.0
Acumulador alcalino de plata-cinc	1.95	1.86	aprox. 1.6

resistencia interna

El voltaje de salida de una batería cae cuando alimenta corriente, debido a que la batería tiene una *resistencia interna*, la cual resulta de la oposición que ofrecen los electrodos y el electrolito al flujo de corriente. Cuando la corriente fluye a través de esta resistencia interna, una parte del voltaje de la batería cae, de esta manera queda menos voltaje disponible en las terminales de salida. Al gastarse la batería, los electrodos y el electrolito de la celda se deterioran y se vuelven cada vez peores conductores. Entonces, la resistencia de las celdas aumenta y el voltaje de salida disminuye.



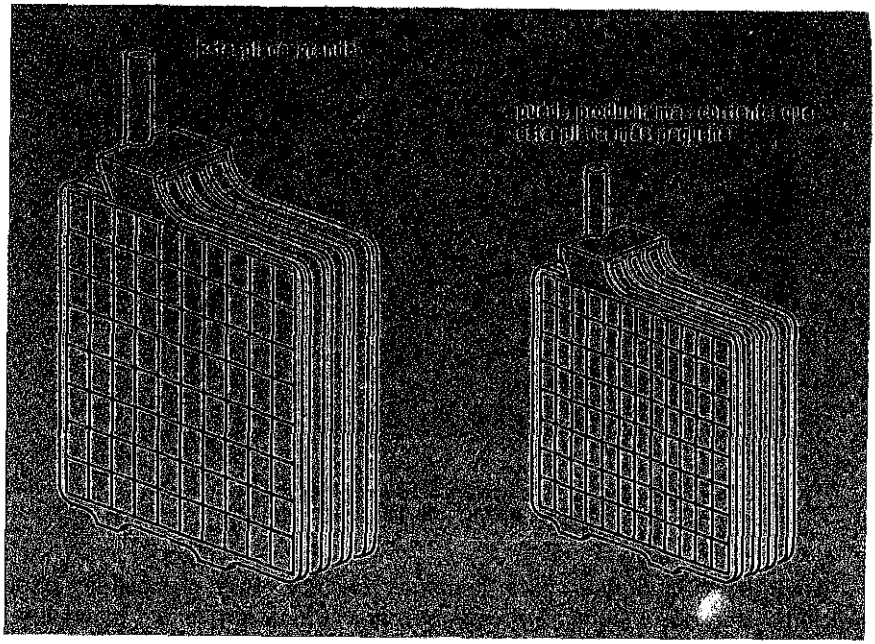
Toda celda tiene una resistencia interna que baja parte del voltaje de la celda cuando fluye corriente. Mientras más desgastada esté una batería, más alta será su resistencia interna. La salida de la batería con carga es

$$E_{\text{CON CARGA}} = E_{\text{SIN CARGA}} - IR_{\text{INTERNA}}$$

En el caso de que una batería esté gastada, la resistencia interna es tan grande que el voltaje se reduce hasta el punto en que la batería resulta inútil. La resistencia interna de una celda seca suele ser de sólo unos 0.2 ohms; pero si una batería consta de seis celdas secas, la resistencia interna total será de 1.2 ohms. Seis seldas secas de 1.5 volts, producen un voltaje de circuito abierto de 9 volts. Pero en un circuito que tome 500 miliamperes, el voltaje sería de 8.4 volts. Al desgastarse la batería y aumentar su resistencia interna a un total de 3.6 ohms, la fem de salida se reduciría a 7.2 volts.

corrientes nominales

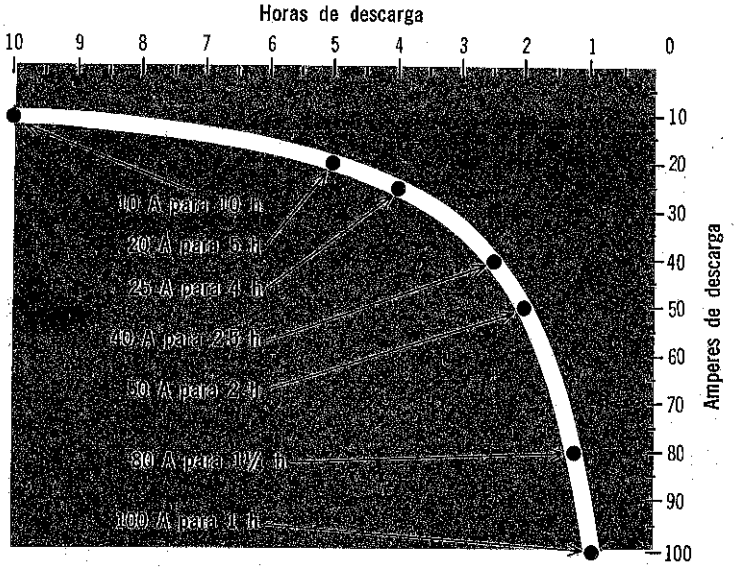
El tamaño físico de una batería no tiene ningún efecto sobre la fem que produce, pero sí afecta la cantidad de corriente que puede producir la batería. Cuanto mayor sea el área de los electrodos, mayor será la corriente que pueda producir la batería. A ello obedece que los acumuladores se construyan con placas entrelazadas. Ambos lados de cada una de las placas de determinado electrodo pueden suministrar corriente. El entrelazado de las placas también hace posible acercar los electrodos, lo cual reduce la resistencia interna de la batería de manera que las corrientes elevadas no reduzcan el voltaje de salida tanto como lo harían de otra manera.



Las baterías se clasifican según la cantidad de *corriente* que pueden suministrar en un tiempo dado. La clasificación se hace en ampere-horas. En el caso de los acumuladores, el tiempo normal que generalmente dura es de 20 horas. De esta manera, si un acumulador tiene clasificación de 100 ampere-horas nominales, esto significa que suministrará 5 amperes durante 20 horas antes de que su fem disminuya al nivel de descarga, que es de 1.75 volts por celda. Pero también puede suministrar más corriente por menos tiempo, o menos corriente durante más tiempo; la clasificación en ampere-horas es la misma. Por ejemplo, puede producir 50 amperes durante dos horas o 4 amperes durante 25 horas. Cuanta menos corriente suministre, más tiempo durará.

corrientes nominales (cont.)

Además, para la clasificación básica de una batería se supone que ésta funciona a una temperatura de 27° C (80° F). A bajas temperaturas, la actividad química de la batería se hace más lenta y la batería no puede proporcionar la misma cantidad de corriente. Por lo tanto, las baterías que se usan en el exterior, por ejemplo las de automóvil, tienen, además una clasificación de ampere-horas para temperaturas bajas, por ejemplo para −18° C (0° F).



Esta curva muestra las diferentes combinaciones corriente-tiempo que se pueden obtener con una unidad de 100 ampere-horas

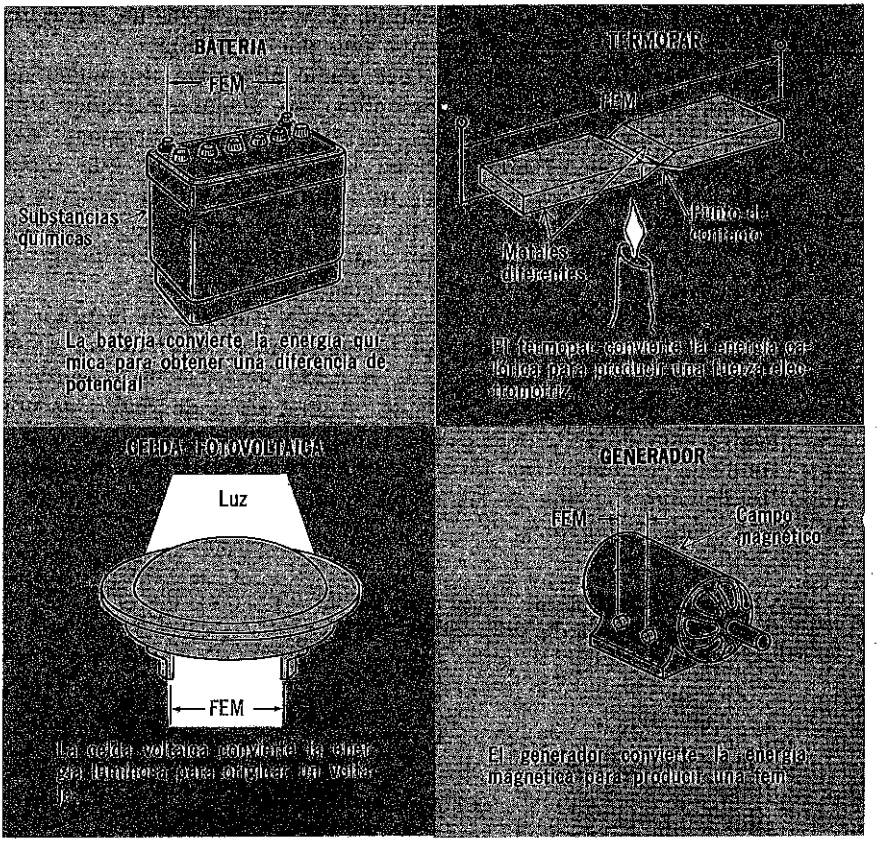
Algunos acumuladores para lámparas móviles están clasificados para funcionar durante 4 horas; sin embargo, la clasificación se indica en ampere-horas. Otro método, más antiguo, para clasificar la corriente, que a veces también se indica, es según la corriente máxima que una batería puede suministrar durante *20 minutos*. Esto sólo se indica en amperes, y no debe considerarse como una clasificación de ampere-horas. Se conoce como *capacidad* de 20 minutos.

La clasificación en ampere-horas se especifica para uso *continuo* durante cierto periodo. En realidad, si la batería sólo se usa intermitentemente, durará más de lo que indica su clasificación, debido a que puede recuperarse entre los ciclos de descarga. Esto ocurre especialmente en las pilas secas, que generalmente se diseñan para usarse sólo por periodos de 15 o 20 minutos. Comúnmente, como las pilas secas no pueden generar altas corriente, su clasificación se da en *miliampere-horas* o *microampere-horas*.

ESC. NAUTICA MERCANTE PROPIEDAD DE FERNANDO SUAREZ "ACERVO"

otras celdas voltaicas

La batería se basa casi totalmente en la energía química del electrolito para que los electrodos produzcan carga. Por otra parte, en el volumen 1 se estudió cómo se pueden usar otras formas de energía para producir cargas eléctricas. El magnetismo es el tipo de energía que se usa más comúnmente. Los dispositivos que producen energía eléctrica mediante el magnetismo corresponden a una categoría conocida como generadores de c-c y de c-a, que se estudian en la última parte de este volumen.



También se pueden aprovechar la luz y el calor como fuentes de energía para generar una fem. Las fuentes que funcionan mediante luz se conocen como *celdas fotovoltaicas,* y las que funcionan por medio de calor se conocen como *celdas termoeléctricas.* También se puede generar una fem a base de los efectos triboeléctrico y piezoeléctrico; pero, generalmente estos efectos no se usan en fuentes de energía.

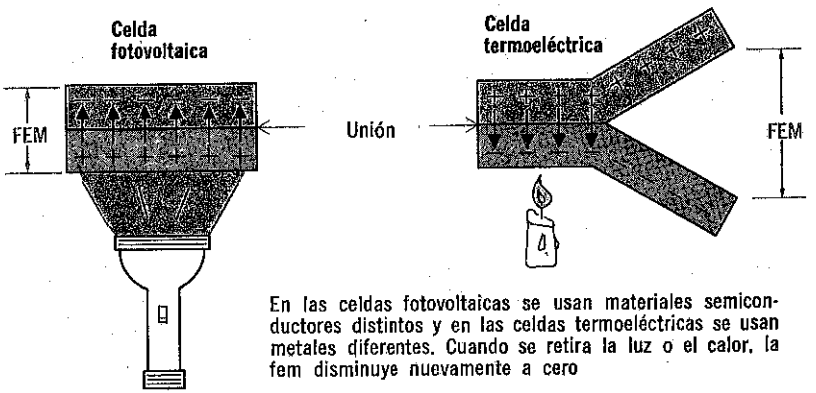
celdas fotovoltaicas y termoeléctricas

Las celdas fotovoltaicas constituyen una de las tres principales categorías de fotoceldas. Las otras dos las constituyen las celdas *fotoconductoras* y las *fotoemisoras*. Sin embargo, estos dos tipos de celda no son fuentes de energía, ya que deben ser energizadas por una fuente de energía para que puedan funcionar. Básicamente, la celda fotoconductora es un dispositivo de resistencia variable que hace posible el paso de mayor corriente en un circuito, cuando incide luz sobre ella; y una celda fotoemisora generalmente es un tubo electrónico con un elemento que emite electrones a una placa. Sin embargo, estos dispositivos no son celdas voltaicas debido a que no producen una fem por sí mismos.

La celda *fotovoltaica* consta de dos semiconductores diferentes que están unidos. Y cuando la luz incide sobre uno de los materiales semiconductores, la energía liberada por la luz hace que electrones libres crucen la unión hacia el otro material semiconductor. De esta manera, cuando la luz incide sobre la celda, un lado de ésta queda con una carencia de electrones y el otro con un exceso; así, se produce una fem entre los dos materiales. Sin embargo, cuando se retira la fuente de luz, los electrones regresan de la unión y la fem se reduce a cero.

La celda *termoeléctrica* aprovecha la energía calórica en la unión de dos metales distintos para hacer que los electrones crucen dicha unión. Igual que en el caso de la fotocelda, la celda termoeléctrica pierde su fem cuando se retira la fuente de calor. Ambos tipos de celdas generan sólo una fracción de volt, pero pueden sumarse muchas de ellas en serie para aumentar la fem. Una serie de celdas termoeléctricas interconectadas, se llama *termopila*. A las celdas termoeléctricas generalmente se les conoce como *termopares*.

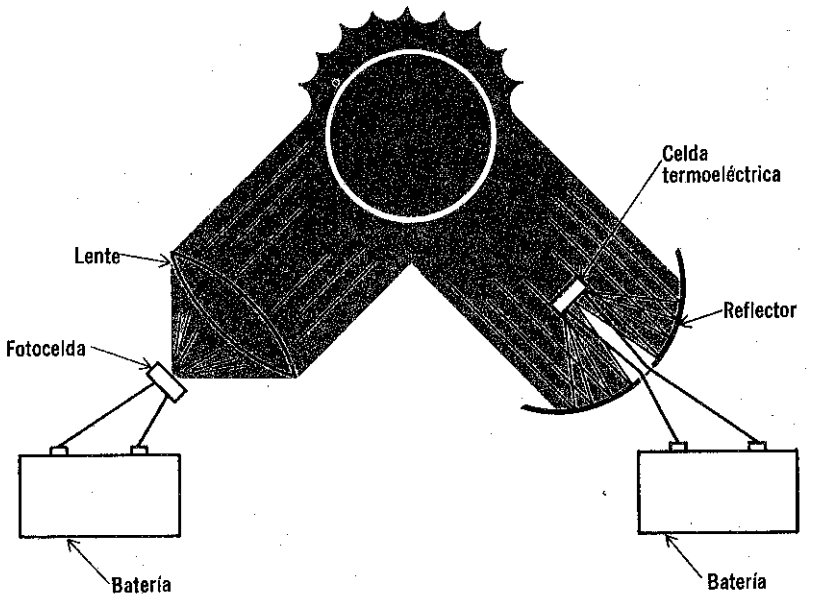
La luz o la energía calórica pueden originar una transferencia de electrones entre dos materiales diferentes para producir una fem



En las celdas fotovoltaicas se usan materiales semiconductores distintos y en las celdas termoeléctricas se usan metales diferentes. Cuando se retira la luz o el calor, la fem disminuye nuevamente a cero

celdas solares

Nótese que las celdas fotovoltaica y termoeléctrica básicas tienen una utilidad limitada como fuentes de energía debido a que pierden su fem cuando desaparece el suministro de energía calórica o luminosa. Por sí mismas, estas celdas generalmente se usan como fuentes de *señal,* no como fuentes de energía. Pero, cuando se combinan con acumuladores químicos, se convierten en buenas fuentes de energía. Generalmente ésta es la forma en que las *celdas solares* aprovechan la energía solar, cuando se usan en radios portátiles y satélites artificiales.



Una celda solar tiene celdas fotovoltaicas o termoeléctricas que sirven como pilas primarias para mantener cargado un acumulador

Las celdas fotovoltaicas y termoeléctricas se utilizan como fuentes primarias para cargar un acumulador. Luego, al desaparecer la fem de las celdas primarias en el ocaso del Sol, los acumuladores continúan suministrando potencia. Los acumuladores se recargan repetidamente cada vez que los rayos del Sol inciden sobre las celdas primarias. La celda fotovoltaica aprovecha directamente la energía luminosa del Sol; pero las celdas termoeléctricas aprovechan el calor de los rayos del Sol. Se emplean lentes de varios tipos para concentrar los rayos de manera que las celdas se hagan más efectivas y se conectan numerosas celdas en serie para producir la fem conveniente.

resumen

☐ Cuando se conectan celdas en serie, sus voltajes de salida se suman. Sin embargo, la corriente total de salida no aumenta. ☐ Cuando se conectan celdas en paralelo, la corriente total de salida es igual a la suma de las corrientes de cada una de las celdas. Sin embargo, el voltaje total de salida no aumenta. ☐ Cuando no alimenta corriente, la clasificación de voltaje de la batería es igual a su voltaje de salida. ☐ La resistencia interna resulta de la oposición al flujo de la corriente que ofrecen los electrodos y el electrolito.

☐ Cuanto mayor sea el área superficial de los electrodos, más corriente puede producir una batería. ☐ La clasificación de corriente de una batería se especifica en ampere-horas. ☐ Las clasificaciones de corriente generalmente se especifican para una temperatura de 27° C (80° F). A bajas temperaturas, la actividad química de una batería se hace lenta, de manera que la clasificación de corriente disminuye. ☐ Las clasificaciones de ampere-horas se refieren a uso continuo. ☐ Si una batería se usa intermitentemente, durará más de lo que señala la clasificación de ampere-horas.

☐ Una celda fotovoltaica produce una fem cuando la luz incide sobre ella. Cuando se retira la fuente de luz, la fem baja a cero. ☐ Una celda termoeléctrica produce una fem al ser calentada. ☐ Una disposición en serie de celdas termoeléctricas recibe el nombre de termopila. ☐ La celda solar consiste de una celda fotovoltaica o termoeléctrica combinada con una batería química.

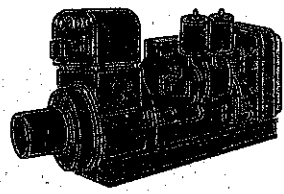
preguntas de repaso

1. ¿Qué significa voltaje sin carga de una batería?
2. ¿Qué produce la resistencia interna de una batería?
3. Si una batería de 6 volts tiene una resistencia interna de 0.1 ohm, ¿cuál es su voltaje de salida cuando alimenta a una corriente de 5 amperes?
4. ¿Cuál es el voltaje de salida de 6 baterías de 2 volts, conectadas en serie acumulativa? ¿Cuál será el voltaje de salida si se conectan en paralelo?
5. Una batería tiene una clasificación de 80 ampere-horas, ¿cuánta corriente continua puede suministrar durante 10 horas?
6. ¿Durante cuánto tiempo puede la batería de la pregunta 5 suministrar 4 amperes de corriente en forma continua?
7. ¿De qué manera afecta la temperatura en la clasificación de corriente de un acumulador?
8. ¿Por qué no se usan generalmente las celdas fotovoltaicas y termoeléctricas como fuentes de energía?
9. ¿Qué es una *celda solar*?
10. Dos celdas, cada una con una resistencia interna de 0.2 ohms, se conectan en paralelo. ¿Cuál es la resistencia interna total?

generadores

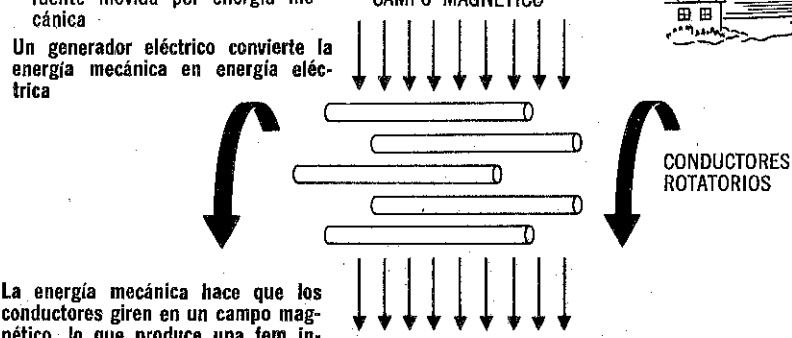
Hasta aquí, ya se explicó cómo se transforman tres clases diferentes de energía en energía eléctrica. Las *baterías* transforman la *energía química* en electricidad; las *celdas fotovoltaicas*, la *energía luminosa* en electricidad; y, finalmente, los *termopares* convierten la *energía calórica* en electricidad. Ahora se estudiarán los dispositivos que transforman la *energía mecánica* en energía eléctrica. A estos dispositivos se les llama *generadores.*

Básicamente, un generador produce electricidad por la *rotación* de un grupo de conductores dentro de un *campo magnético.* Por lo tanto, la energía que entra a un generador es la energía mecánica necesaria para hacer que giren conductores. Esta energía puede provenir de motores de gasolina o diesel, o bien de turbinas de vapor, motores eléctricos, agua corriente y hasta de reactores atómicos. De hecho, todo lo que pueda hacer girar a un eje puede ser la energía que entre a un generador eléctrico. A la salida del generador se obtiene la fem que se induce en los conductores cuando éstos se mueven a través del campo magnético. Como un generador requiere un campo magnético para funcionar también podría definirse como un mecanismo que convierte energía mecánica en energía eléctrica por medio de un campo magnético o por *inducción magnética.* Los principios de la inducción magnética se estudiaron en los volúmenes 1 y 3.



Un generador de diesel es una fuente movida por energía mecánica

Un molino de viento es una fuente movida por energía mecánica

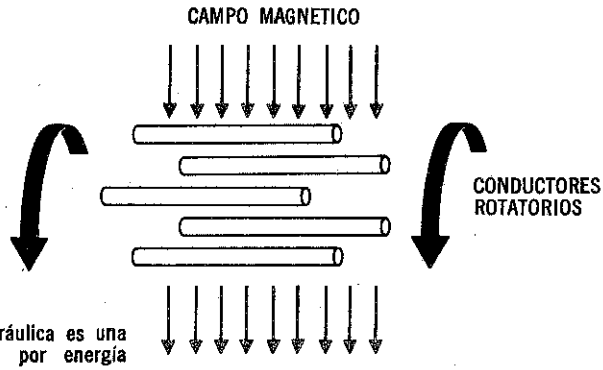


Un generador eléctrico convierte la energía mecánica en energía eléctrica

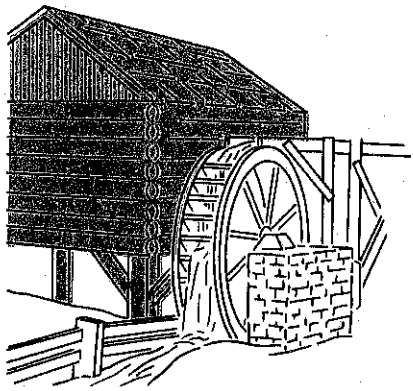
La energía mecánica hace que los conductores giren en un campo magnético, lo que produce una fem inducida en los conductores. La fuente movida por energía mecánica puede ser cualquier cosa que haga que los conductores giren

generadores (cont.)

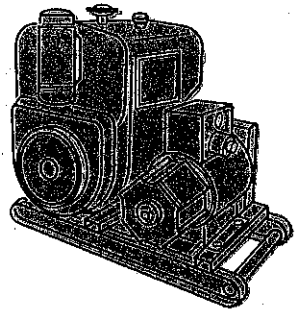
Aunque se clasifican de muchas maneras, existen sólo dos tipos básicos de generador: *generadores de c-c* que tienen una salida de voltaje continuo y los *generadores de c-a* que tienen una salida de voltaje alterno. Se observará que los principios de funcionamiento para ambos tipos de generador son similares en muchos sentidos.



Una rueda hidráulica es una fuente movida por energía mecánica



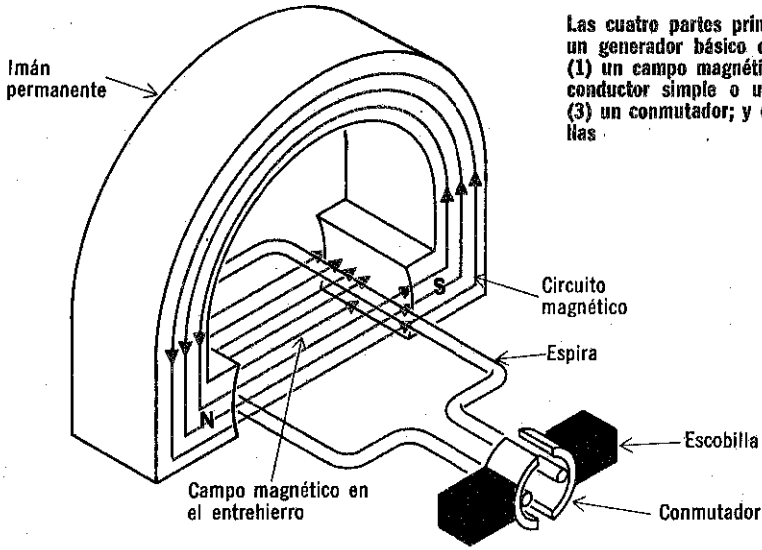
Un motor de gasolina es una fuente movida por energía mecánica



Desde el punto de vista de la cantidad total de potencia producida, los generadores constituyen la más importante fuente de energía de las que se usan actualmente en el mundo. Ninguna otra fuente práctica de energía puede producir las grandes cantidades de potencia eléctrica que producen los generadores. Sin embargo, esto no significa que los generadores constituyan la mejor fuente de energía para todas las aplicaciones. Deben estar localizados en la fuente de energía mecánica o cerca de ella, y por lo tanto, a diferencia de las baterías, no se pueden usar en los casos en que se requieren fuentes de energía portátiles. Además, a menudo resultan antieconómicos cuando se trata de producir poca potencia.

el generador básico de c-c

El generador básico de c-c tiene cuatro elementos principales: 1) un campo magnético; 2) un conductor único o en espira; 3) un conmutador y 4) escobillas. El *campo magnético* puede proporcionarlo bien un *imán permanente* o un *electroimán*. Por el momento, se supondrá que se usa un imán permanente. Según se aprecia, se puede considerar que el campo magnético está formado por líneas de flujo magnéticas que forman un circuito magnético *cerrado*. Las líneas de flujo salen del polo norte del imán, cruzan el entrehierro que hay entre los polos del imán, entran al polo sur y luego atraviesan el imán, para entrar al polo norte.



Las cuatro partes principales de un generador básico de c-c son (1) un campo magnético; (2) un conductor simple o una espira; (3) un conmutador; y (4) escobillas

El conductor único tiene forma de *espira* y está colocado entre los polos magnéticos. Por lo tanto, la espira se halla en el campo magnético. En tanto la espira no gire, el campo magnético no tiene efecto sobre ella; pero al girar, corta las líneas de flujo magnético y, según se ha visto en los volúmenes 1 y 3, esto hace que se *induzca* una fem en la espira.

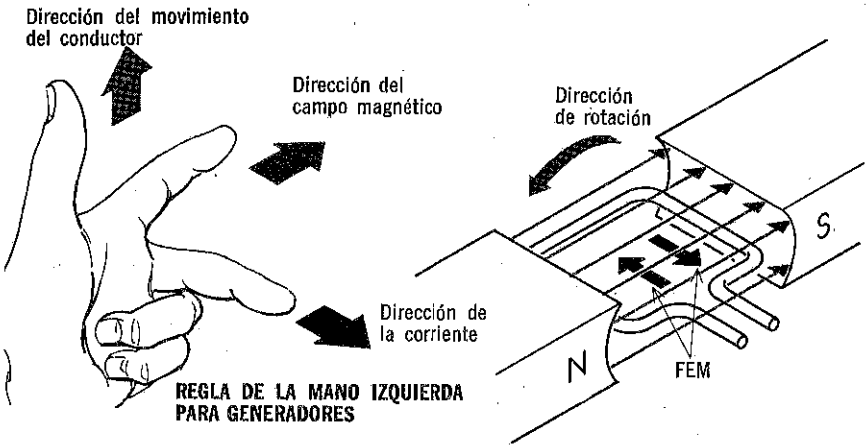
Se verá que, para cada rotación completa de la espira, la amplitud y dirección de la fem inducida sigue un ciclo de una *onda sinusoidal*. Por lo tanto, al girar la espira, se obtiene un voltaje sinusoidal o de c-a en los extremos de la misma. Como, por definición, los generadores de c-c tienen salidas de c-c, el voltaje de c-a debe transformarse en voltaje de c-c. Esto se hace mediante un *conmutador*. La salida de c-c del conmutador se transfiere a un circuito externo por medio de *escobillas*, también llamadas *carbones*.

producción de voltaje

En este punto, hay que revisar algo de la teoría básica del generador, la cual se expuso en los volúmenes 1 y 3. Esta teoría se aplica no sólo a los generadores de c-c que se están estudiando ahora, sino también a generadores de c-a.

Siempre que haya un *movimiento relativo* entre un campo magnético y un conductor y la dirección del movimiento sea tal que el conductor *corte* líneas de flujo del campo magnético, se tiene una fem inducida en el conductor. Por lo que respecta a los generadores, la *magnitud* de la fem inducida depende principalmente de la *intensidad* del campo magnético y de la *rapidez* con la que se cortan las líneas de flujo. Cuanto más intenso sea el campo o mayor sea el número de líneas de flujo cortadas en un tiempo dado, mayor será la fem inducida. Para los generadores, la dirección o polaridad de la fem se determina por la regla de la mano izquierda. Según esta regla, se extienden el pulgar, índice y dedo medio de manera que queden colocados en ángulos rectos entre sí. Luego, si se señala con el índice en la dirección del campo magnético y el pulgar señala la dirección de movimiento del conductor, el dedo medio señalará la dirección del flujo de la corriente.

Aplicando la regla de la mano izquierda al generador básico de una espira, en la ilustración se puede apreciar que se tienen dos fem en la espira, al girar. Estas se inducen en lados *opuestos* de la espira y tienen *amplitudes iguales*. Sus direcciones son tales que están en serie con respecto a las terminales abiertas de la espira. En efecto, la amplitud del voltaje en las terminales de la espira es *lo doble* de la amplitud del voltaje inducido en ambos lados de la espira.

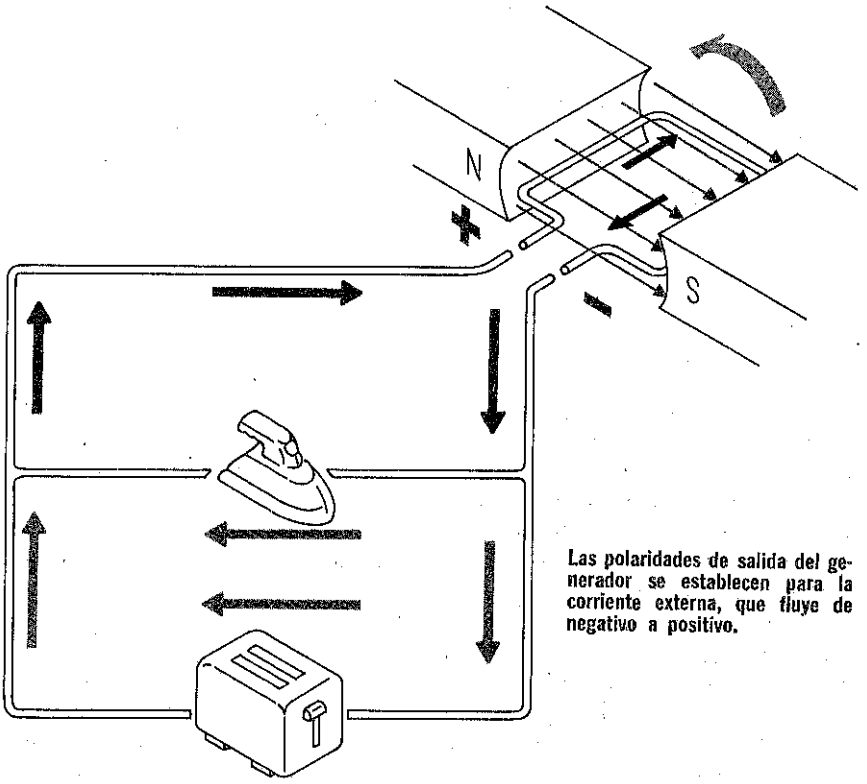


Si se aplica la regla de la mano izquierda al generador básico de una sola espira, muestra que se induce una fem en cada lado de la espira y que estas fem están en serie.

Puede ser que al girar la espira, el lado que en ese instante se mueve hacia arriba se moverá hacia abajo, y viceversa. Así pues, la polaridad de la fem en cada lado también se invertirá.

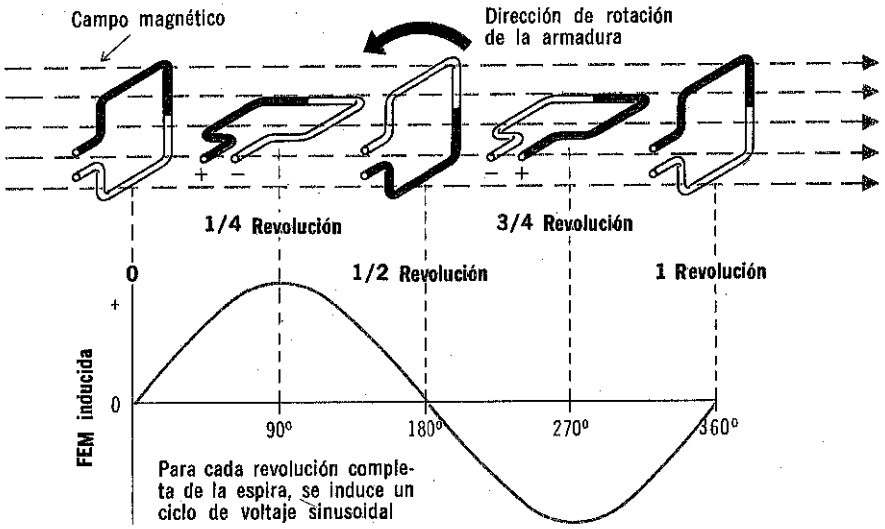
polaridades

Ya se explicó que en un circuito, la corriente eléctrica fluye de negativo a positivo. Sin embargo, el generador en sí mismo no es un circuito sino una fuente de energía. Así pues, según lo aprendido en el volumen 2, la corriente eléctrica *dentro* de la fuente de energía, fluye de positivo a negativo.



Las polaridades de salida del generador se establecen para la corriente externa, que fluye de negativo a positivo.

Esencialmente, las polaridades se marcan en el generador para indicar cómo la corriente eléctrica inducida en el generador produce cargas eléctricas en las conexiones de salida. Nótese que la corriente inducida hace que los electrones fluyan en una dirección tal que los electrones se acumulan en una terminal de salida y hay deficiencia de electrones en la otra. Así pues, las *polaridades* del generador se identifican según las *cargas producidas*. Luego, cuando se conecta una carga al generador, la corriente fluye a través de la carga, de negativo a positivo.



producción de una onda sinusoidal

Según se dijo anteriormente, el generador básico de c-c produce una salida sinusoidal que se convierte en c-c por medio de un conmutador. Haciendo caso omiso del conmutador por el momento, en la figura se puede notar que por cada *rotación completa* de la espira se genera *un ciclo* de salida sinusoidal. Cuando el plano de la espira es *perpendicular* al campo magnético, los lados de la espira pasan *entre* las líneas de flujo. Por lo tanto, no hay corte de líneas de flujo, y el voltaje inducido es nulo. Esto sucede dos veces durante cada rotación completa.

Cuando el plano de la espira es paralelo al campo magnético, sus lados cortan directamente las líneas de flujo; así, el voltaje inducido es *máximo,* ya que la velocidad con que la espira corta las líneas de flujo es máxima. Esto vuelve a ocurrir dos veces durante cada rotación completa. Sin embargo, la fem máxima tiene una dirección en una posición de la espira, en tanto que 180° después tiene la dirección opuesta, de acuerdo con la ley de la mano izquierda.

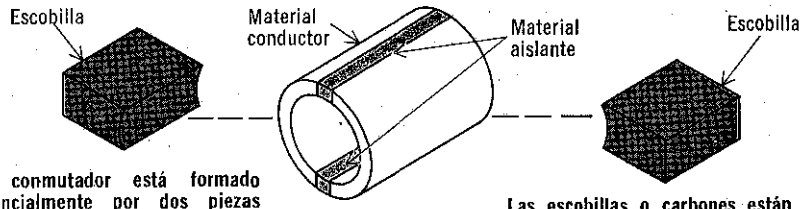
En todas las otras disposiciones de la espira, sus lados cortan en ángulo a las líneas de flujo. El alambre tarda un poco más en pasar de una línea de flujo a otra, de manera que es menor el corte de líneas de fuerza en un lapso dado. Por lo tanto, el voltaje inducido tiene un valor intermedio entre su valor máximo entero, y disminuye conforme aumenta el ángulo que forma la espira desde el paralelo al perpendicular. Luego, cuando los lados de la espira pasan por la posición perpendicular de cero volts, empiezan a cortar las líneas de flujo en dirección opuesta, induciéndose una fem opuesta, la cual aumenta hasta que la espira está colocada paralelamente a las líneas de flujo. Luego, el proceso se repite.

funcionamiento del conmutador

Como se sabe, el conmutador convierte en voltaje de c-c al voltaje de c-a generada en la espira rotatoria. Sin embargo, también sirve como medio para conectar las *escobillas* a la *espira rotatoria.* La forma en que el conmutador convierte c-a en c-c se relaciona directamente con su función de contacto entre las escobillas y la espira.

Téngase presente que el objeto de las escobillas es conectar el voltaje del generador con un circuito externo. Para esto, cada escobilla debe hacer contacto con cada uno de los extremos de la espira. Las conexiones directas resultan imprácticas porque la espira gira. En lugar de ello, las escobillas se conectan a los extremos de la espira por medio del conmutador.

El conmutador está formado por dos piezas *semicilíndricas* de material conductor suave, separadas por material aislante. Cada mitad del conmutador está permanentemente conectada a un extremo de la espira y, por lo tanto, el conmutador gira cuando lo hace la espira. Cada escobilla está sobre un lado del conmutador y se *desliza* a lo largo del conmutador conforme éste y la espira giran. De esta manera, cada escobilla hace contacto con la terminal de la espira conectada a la mitad del conmutador sobre la cual está la escobilla.

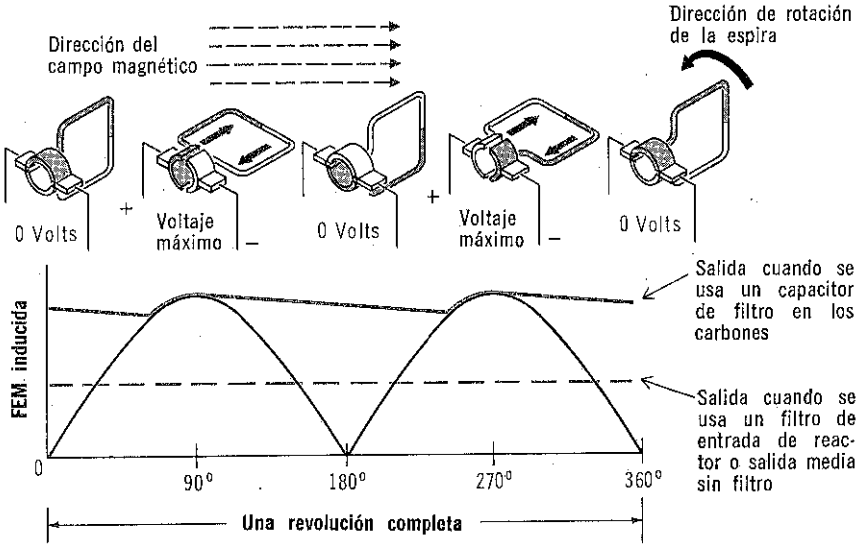


El conmutador está formado esencialmente por dos piezas metálicas semicilíndricas separadas por un material aislante

Las escobillas o carbones están hechas de material conductor suave, que se desliza con facilidad sobre el conmutador

Al *girar el conmutador,* estando las *escobillas estacionarias,* cada una de éstas primero hace contacto con una mitad del conmutador y luego con la otra. Esto significa que cada escobilla hace contacto primero con un extremo de la espira y luego con el otro. Las escobillas están colocadas en lados *opuestos* del conmutador de manera que pasan de una mitad del conmutador a la otra en el instante en que la espira llega al punto de su rotación donde el voltaje inducido invierte su polaridad. Así pues, cada vez que las terminales de la espira invierten su polaridad, las escobillas pasan de una mitad o segmento del conmutador, a la otra. De esta manera, una escobilla siempre es positiva respecto a la otra. Por lo tanto, la amplitud del voltaje que hay entre escobillas fluctúa entre cero y algún valor máximo; pero siempre tiene *la misma polaridad.* Por lo tanto, a la salida del generador se obtiene voltaje de c-c fluctuante.

funcionamiento del conmutador



En la siguiente página se muestra cómo funcionan el conmutador y las escobillas para producir una salida de c-c fluctuante. Un punto importante que debe hacerse notar, es que al pasar cada una de las escobillas de un segmento del conmutador a otro, hay un instante durante el cual establece contacto con ambos segmentos. El voltaje inducido en este instante es nulo. Si no fuese así, fluirían corrientes elevadas en la espira y la dañarían, ya que, por medio de las escobillas, los extremos de la espira se conectan directamente en corto circuito. Se llama *plano neutro* a la posición en que las escobillas hacen contacto con ambos segmentos del conmutador, que es cuando el voltaje inducido es nulo.

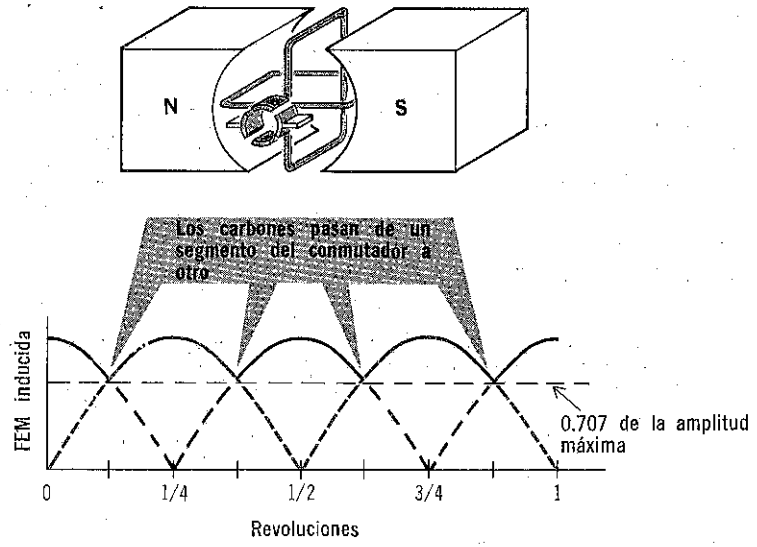
Si se estudia el diagrama, se notará que la escobilla de la izquierda siempre está conectada al lado de la espira que se mueve hacia abajo, lo cual hace que la escobilla izquierda siempre sea positiva, cosa que puede verificarse mediante la regla de la mano izquierda. En forma similar, la escobilla derecha siempre está conectada al lado de la espira que se mueve hacia arriba, lo cual hace que la escobilla derecha sea siempre negativa. Así pues, en lugar de que el voltaje de salida invierta su polaridad después de media revolución, la salida de voltaje para la segunda media revolución es idéntica a la que tuviera en la primera mitad. Entonces el conmutador y las escobillas convierten la c-a inducida en c-c pulsante. Si se conecta un capacitor como filtro en las escobillas, se produciría un voltaje de c-c más uniforme, próximo a la amplitud máxima. Si se usara un filtro de entrada de inductor, el voltaje de salida estaría al nivel medio de la c-c fluctuante. Aun sin usar filtro, se considera que la salida es el valor medio.

aumento del número de espiras

Como ya se explicó en la página anterior, si no se usa un filtro, a la salida del generador básico de una espira se obtendrá un voltaje de c-c fluctuante que alcanza su amplitud máxima y desciende a cero dos veces durante cada rotación completa de la espira. Esta variación en el voltaje producido se llama *ondulación* y hace que la salida sea inadecuada para muchas aplicaciones.

La variación u ondulación del voltaje de salida se puede reducir mediante *dos* espiras rotatorias, colocadas en *ángulo recto* entre sí. Cada terminal de ambas espiras se conecta a un segmento de conmutador *separado,* de manera que el conmutador tiene un total de *cuatro segmentos.* Todavía hay sólo dos escobillas, colocadas de manera que, al girar las espiras y los segmentos del conmutador, primero hagan contacto con los segmentos del conmutador para una espira y luego para la otra.

Para cada espira, las escobillas y segmentos del conmutador efectúan la misma función que en el generador de una sola espira. Es decir, una escobilla siempre está en contacto con el extremo de la espira que es negativo y la otra siempre está en contacto con el extremo de la espira que es positivo. Así pues, el voltaje de c-a inducido en la espira se convierte en voltaje de c-c fluctuante.

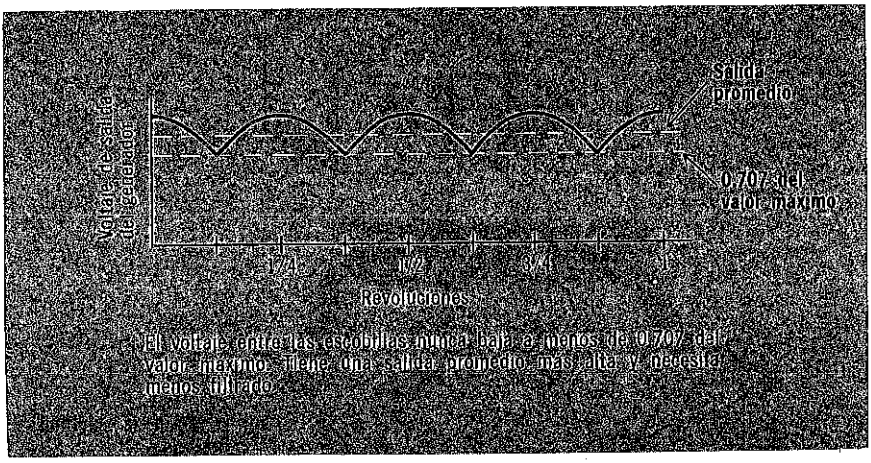


Los voltajes inducidos en cada espira son iguales, pero defasados 90°. Cuando las espiras llegan al punto de su rotación en donde sus voltajes son 0.707 del valor máximo, los carbones pasan del segmento del conductor correspondiente a la espira con voltaje decreciente, hacia la espira con voltaje creciente.

aumento del número de espiras (cont.)

Sin embargo, se observa una diferencia importante en el generador de dos espiras, la cual consiste en que una espira siempre está atrasada 90° de rotación con respecto a la otra. Así pues, cuando el voltaje de una espira *disminuye*, el de la otra *aumenta*, y viceversa. La posición de las escobillas es tal que, al girar las espiras y el conmutador, las escobillas siempre están en contacto con los segmentos del conmutador de la espira que tiene el voltaje inducido *más alto*. Al descender el voltaje en una espira por debajo del de la otra, las escobillas pasan de los segmentos del conmutador de la espira que tiene voltaje decreciente a los segmentos de la espira que tiene voltaje creciente. Este cambio ocurre *cuatro veces* durante cada rotación completa de las dos espiras y, debido a ella, el voltaje de salida del generador, el cual se produce entre las dos escobillas, nunca desciende hasta menos de un valor de 0.707 veces la amplitud máxima del voltaje inducido en una de las espiras. Estas salidas de c-c requieren menos filtraje que el generador de una sola espira.

Debe notarse aquí que, aunque el uso de dos espiras *separadas* disminuye la fluctuación del voltaje de salida, no tiene efecto en el voltaje máximo de salida. Así pues, el voltaje medio es más alto.



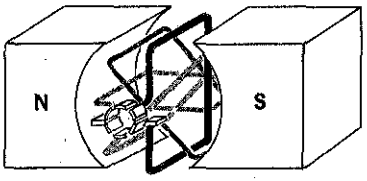
Ya se ha explicado cómo, usando de dos espiras separadas en lugar de una, puede reducirse la ondulación del voltaje de salida del generador. Cuantas más espiras separadas se usen, más puede reducirse la ondulación y el voltaje de salida del generador será prácticamente c-c. Entonces se necesitaría poco o ningún filtraje y la salida media sería prácticamente el voltaje máximo.

aumento del número de espiras (cont.)

Por cada espira separada que se aumente, deben añadirse *dos* segmentos más del conmutador. Uno para cada extremo de la espira. Así pues, siempre se tendrá una *relación de dos a uno* entre el número de segmentos del conmutador y el de espiras separadas. Se necesitan cuatro segmentos para dos espiras; seis segmentos para tres, etc. Los generadores reales de c-c tienen muchas espiras separadas y lo doble de segmentos en el conmutador. Por lo tanto, si se cuenta el número de segmentos de un generador, la mitad de ese número será el de espiras separadas.

En la figura se ilustra la forma de onda de salida de un generador con cuatro espiras separadas. Ahora también debe notarse que, aunque al aumentar el número de espiras separadas disminuye la variación entre la salida máxima y mínima, no aumenta el voltaje máximo de salida sino sólo la media.

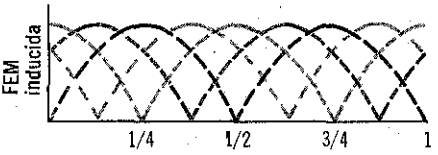
Prácticamente, en todos los generadores las espiras y el conmutador juntos reciben generalmente el nombre de *armadura* y, a veces, de *rotor*; la armadura es, pues, en este tipo de generador, la parte que gira.

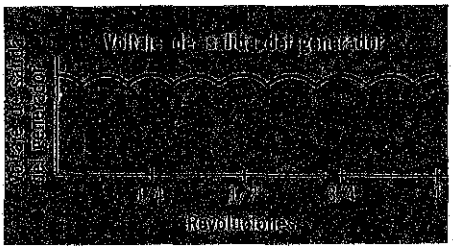


Cada espira adicional requiere de dos segmentos adicionales de conmutador

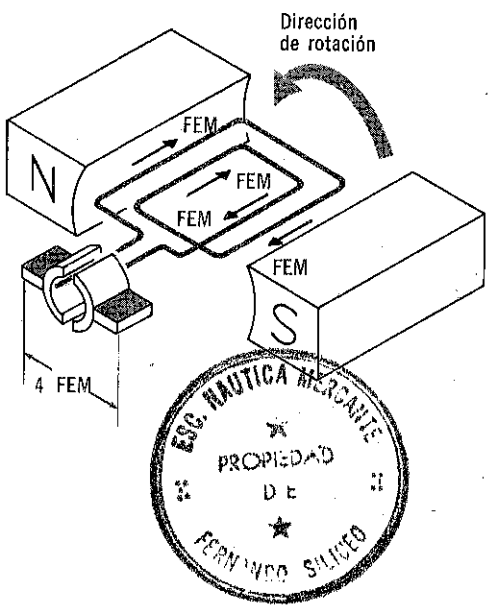
Los segmentos de conmutador y los carbones convierten los voltajes de c-a inducidos a voltajes fluctuantes de c-c, en la misma forma que en el generador de una sola espira. Sin embargo, los carbones sólo están en contacto con los segmentos durante el corto tiempo en que el voltaje en esa espira es próximo a su valor máximo.

Voltajes de espiras individuales

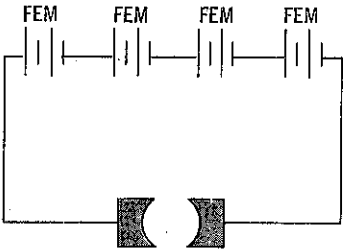




El voltaje medio de salida entre los carbones, es por lo tanto, muy próximo al valor máximo de las espiras individuales.



Una bobina de armadura consta de muchas espiras de alambre, con los dos extremos conectados a segmentos de conmutador



Todos los voltajes inducidos en cada espira están en serie, de manera que entre los carbones se produce un voltaje igual a la suma de todos ellos

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
FERNANDO SILICEO

"ACERVO"

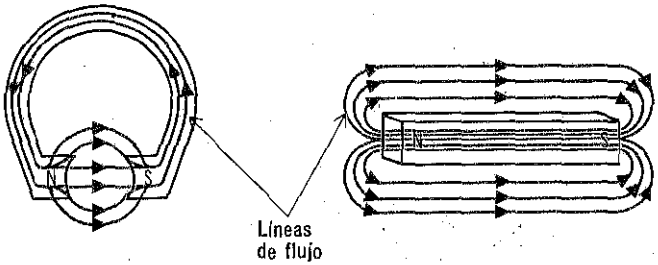
elevación del voltaje de salida

En el generador básico de c-c descrito, la amplitud del voltaje de salida que es igual que el inducido en cada espira rotatoria separada, es *muy pequeña.* Téngase presente que la amplitud del voltaje en cada espira se determina por la *rapidez* con que la espira corta las líneas de flujo magnético; a su vez, esto depende de la intensidad del campo magnético y la velocidad con que gira la espira. Así, se puede pensar que puede aumentar el voltaje si se aumenta la intensidad del campo magnético o la velocidad de rotación, o ambos. Si embargo, ambas medidas resultan imprácticas fuera de ciertos límites.

En cambio, puede aumentarse el voltaje de salida de un generador de c-c a un nivel útil, si a cada espira rotatoria se le añaden *muchas vueltas* de alambre en lugar de una sola. Estas espiras múltiples reciben el nombre de *bobinas de armadura,* o simplemente bobinas. Cada bobina tiene dos extremos y requiere dos segmentos de conmutador, igual que una espira simple de una vuelta. Entonces el voltaje total inducido en una bobina es igual a la *suma* de cada uno de los voltajes inducidos en cada espira. Frecuentemente las bobinas de armadura que se usan en generadores tienen muchas espiras, gracias a lo cual pueden obtenerse altos voltajes de salida en el generador. Nótese pues que, para un campo magnético dado y una velocidad de rotación específica, el *número de espiras* en cada bobina determina la *amplitud* del voltaje de salida del generador; en tanto que el número de bobinas determina la cantidad de variación en el voltaje de salida.

producción del campo magnético

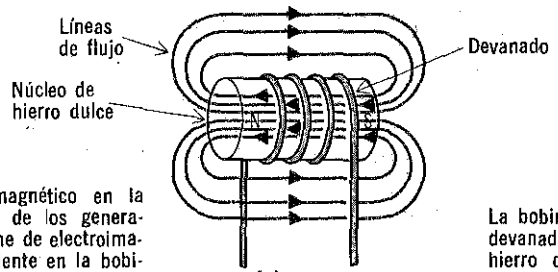
Según se ha mencionado anteriormente, el campo magnético de un generador de c-c puede suministrarlo un imán permanente, o bien, un electroimán. Los imanes permanentes funcionan bien en generadores simples; pero tienen ciertas limitaciones en la mayor parte de los generadores prácticos; las principales son los requerimientos de tamaño y peso y su falta de regulación sobre la salida del generador.



Para producir campos magnéticos de la intensidad requerida, los imanes permanentes deben ser relativamente grandes y pesados

Puesto que la intensidad de su campo magnético es fija, no puede obtenerse regulación alguna del voltaje a salida del generador

Los electroimanes pueden producir campos magnéticos mucho más intensos que los imanes permanentes del mismo tamaño y peso. Además, los electroimanes tienen propiedades que hacen posible regular el voltaje de salida del generador para compensar los cambios en carga y velocidad. Más adelante se estudiará esto. Debido a tales factores, el uso de los imanes permanentes en los generadores está limitado. En la mayor parte de los generadores los campos magnéticos son alimentados por electroimanes. Los que están provistos de imanes permanentes generalmente son pequeños y tienen poca salida y suelen llamarse *magnetos*.



El campo magnético en la mayor parte de los generadores proviene de electroimanes. La corriente en la bobina produce un campo magnético similar al que se tiene en una barra magnética

La bobina generalmente está devanada sobre un núcleo de hierro dulce, que concentra las líneas de flujo y aumenta la intensidad del campo

resumen

☐ Un generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica por la rotación de un grupo de conductores dentro de un campo magnético. ☐ Básicamente, existen dos tipos de generadores: los de c-c y los de c-a. ☐ Un generador simple de c-c consta de un campo magnético, un conductor en forma de espira, un conmutador y escobillas. ☐ El campo magnético de un generador puede producirse por medio de un imán permanente, o bien, un electroimán. ☐ La mayor parte de los generadores están provistos de electroimanes, ya que éstos pueden producir campos más intensos que los imanes permanentes y también constituyen un medio para regular el voltaje de salida del generador.

☐ Al girar, la espira de un generador simple corta las líneas de flujo de un campo magnético. Como resultado, en la espira se induce una fem. ☐ La fem inducida en una sola espira tiene la forma de una onda sinusoidal. ☐ El voltaje de onda sinusoidal inducido en la espira se convierte en c-c fluctuante por medio del conmutador y las escobillas. ☐ Para que ocurra una conmutación apropiada, las escobillas deben estar colocadas en el plano neutro. ☐ La variación de amplitud del voltaje de salida de c-c de un generador de espira única se llama ondulación. ☐ La ondulación se puede reducir usando más de una espira rotatoria simple. ☐ Por cada espira se requieren dos segmentos de conmutador. Así pues, siempre existe una relación de dos a uno entre el número de segmentos de conmutador y el número de espiras separadas.

☐ En los generadores comerciales, cada espira rotatoria está formada por muchas vueltas de alambre. Estas espiras de vueltas múltiples se llaman bobinas de armadura. ☐ El voltaje total inducido en cada bobina de armadura es igual a la suma de los voltajes inducidos en cada espira. ☐ El número de vueltas de cada bobina determina la amplitud de la salida del generador. ☐ El número de bobinas determina la cantidad de variación en el voltaje de salida.

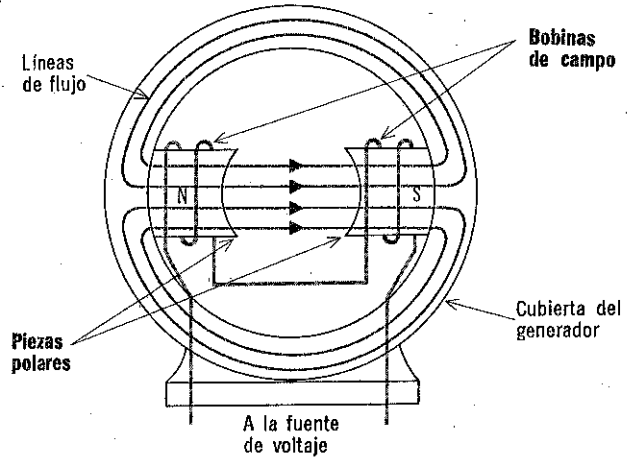
preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la *regla de la mano izquierda para generadores*?
2. ¿Para qué sirven el conmutador y las espiras?
3. ¿Qué es *plano neutro*?
4. ¿Cuál generador ondula menos: uno que tenga dos bobinas de armadura u otro con cuatro bobinas de armadura?
5. Si un generador tiene ocho segmentos de conmutador, ¿cuántas bobinas separadas de armadura tiene?
6. ¿Qué factores determinan el voltaje de salida del generador?
7. ¿Qué es un magneto?
8. ¿Afecta un número creciente de espiras en las bobinas de armadura a la cantidad de variación en la salida de un generador de c-c?
9. ¿Afecta el número de bobinas de armadura al número de escobillas necesario en un generador de c-c?
10. ¿Qué sucedería si las escobillas no estuvieran colocadas en el plano neutro?

devanado de campo

Los electroimanes que se usan para producir el campo magnético de un generador se llaman *bobinas de campo*. En un generador simple, hay dos bobinas de campo colocadas de manera que sus campos magnéticos se combinan para formar un circuito magnético. Como se ilustra en la figura, las bobinas de campo están devanadas alrededor de núcleos llamados *piezas polares,* que son parte de la cubierta del generador. Las dos piezas polares están separadas por un espacio donde se instala la armadura. El circuito magnético cerrado va de la pieza polar "norte" a través de la separación al polo "sur", y luego a través de la cubierta, regresando a la pieza polar norte. La cubierta del generador, igual que las piezas polares, está construida con material de buenas propiedades magnéticas, de manera que ayuda a mejorar la intensidad del campo magnético. No hay conexión eléctrica entre la bobina de campo y las piezas polares o la cubierta del generador. Sólo forman un *circuito magnético.*

El devanado de campo suministra el campo magnético requerido por el generador. Está formado por todas las bobinas de campo y alimentadas por una fuente de voltaje de c-c



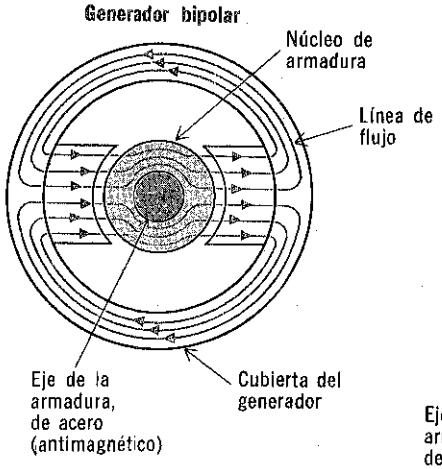
La intensidad del campo magnético originado por el devanado de campo depende no sólo de la estructura física de las bobinas de campo, sino también del nivel de corriente aplicada al devanado. Mientras mayor sea la corriente, más intenso será el campo.

Las dos bobinas de campo están devanadas en *serie,* de manera que están energizadas por la misma fuente de energía, la cual es de c-c y, como resultado, el campo magnético producido por las bobinas de campo siempre tiene la misma dirección. Ambas bobinas de campo, juntas, se llaman *devanado de campo.*

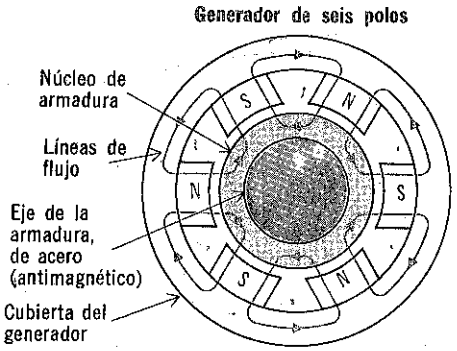
devanados de campo múltiples

El generador simple tiene dos bobinas de campo y, por lo tanto, dos polos: uno norte y otro sur. Este es un generador de dos polos o bipolar. Muchos generadores existentes tienen *cuatro polos, seis polos*, etc. Independientemente del número de bobinas que tenga, el número total de polos siempre es *número par*, ya que por cada polo norte debe existir un polo sur.

Una razón para tener más de dos bobinas de campo es que, al aumentar el número de bobinas de campo o polos, se puede reducir el tamaño y el peso del generador, en tanto que su salida permanece invariable. En un generador bipolar, la mitad de las líneas de flujo debe atravesar la anchura o espesor del núcleo de la armadura, que es de un material magnético. El núcleo de la armadura debe ser lo suficientemente grueso para evitar la *saturación* magnética.



Mientras más polos se tengan, mayor número de trayectorias habrá para las líneas de flujo magnético. En consecuencia, menos líneas de flujo siguen cada trayectoria, de manera que se puede usar material más delgado para aquellas partes del generador que forman el circuito magnético



En un generador de seis polos, sólo es necesario que la sexta parte de las líneas de flujo atraviesen el espesor del núcleo de la armadura en cualquier punto; pero, como hay una serie de líneas de flujo, el número total es el mismo. En consecuencia, el núcleo puede hacerse mucho más delgado y aún seguirá pasando el mismo número total de líneas de flujo, encontrando poca oposición. Esto es lo mismo que sucede con la cubierta del generador, que sirve como parte de la trayectoria para las líneas de flujo. Cuanto mayor sea el número de polos, más delgada puede ser la cubierta. En efecto, cuanto mayor sea el número de polos, más trayectorias tendrán las líneas de flujo.

Otra razón para aumentar el número de polos es que, con ciertos tipos de devanados de armadura, el voltaje de salida del generador puede aumentar. Esto se estudiará posteriormente.

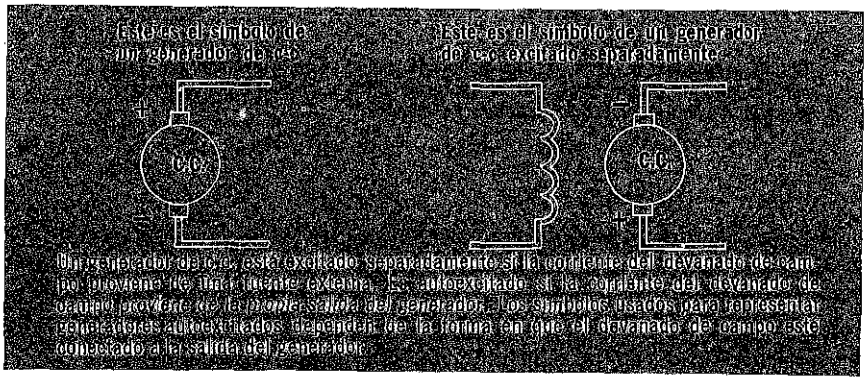
excitación del devanado de campo

Como el devanado de campo es un electroimán, la corriente debe fluir a través de él para producir un campo magnético. Para que funcione debidamente un generador de c-c, el campo magnético del devanado de campo siempre debe tener la misma dirección, de manera que la corriente en el devanado debe ser c-c. Esta se llama *corriente de excitación*, y se alimenta al devanado de campo en una de dos formas: puede provenir de una fuente de energía externa de c-c separada, en cuyo caso, al generador se le llama *generador excitado separadamente*; o puede provenir de la salida misma del generador, en cuyo caso el generador se conoce como *generador autoexcitado*. La fuente de excitación para generadores excitados separadamente puede ser una batería u otro generador de c-c. Cuando se usa un generador, recibe el nombre de *fuente excitadora*.

En un generador autoexcitado, el devanado de campo se conecta directamente con la salida del generador. Puede conectarse *directamente* con la salida, en *serie* con ella o en combinación de ambos tipos de conexión. La forma en que se conecta determina muchas de las características del generador.

Como la excitación separada requiere una batería o un generador separado, generalmente es más costosa que la autoexcitación. Como resultado, la excitación separada normalmente se usa sólo cuando la autoexcitación sea satisfactoria. Esto ocurre en los casos en que un generador debe responder en forma rápida y precisa a una fuente externa de control o cuando el voltaje de salida del generador debe variar en un amplio rango, durante el funcionamiento normal.

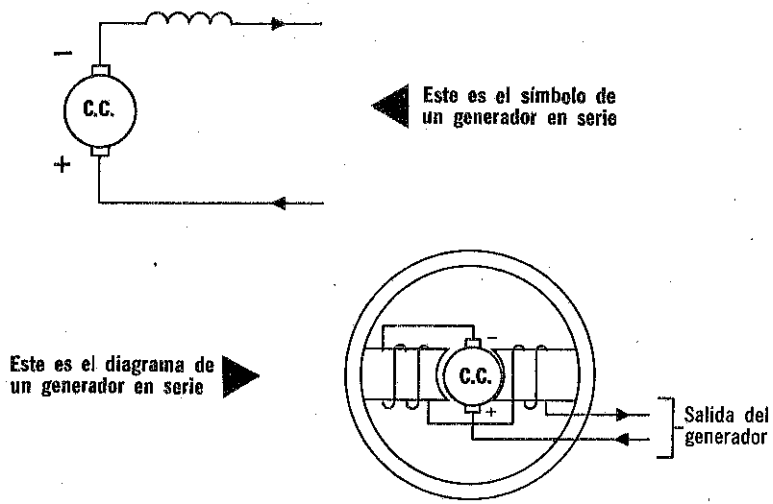
Como la corriente de excitación a través del devanado de campo produce el campo magnético del generador, cuanto mayor sea la corriente de excitación, más intenso será el campo magnético. Esto significa que, para determinada velocidad de rotación del generador, una corriente de excitación grande produce un alto voltaje de salida del generador, en tanto que una pequeña corriente de excitación origina un voltaje de salida bajo. Esto ocurre independientemente de que la corriente de excitación proceda de una fuente externa —como en un generador excitado separadamente— o de la salida propia del generador —como en el caso de un generador autoexcitado.



Un generador de c-c está excitado separadamente si la corriente del devanado de campo proviene de una fuente externa. Es autoexcitado si la corriente del devanado de campo proviene de la propia salida del generador. Los símbolos usados para representar generadores autoexcitados dependen de la forma en que el devanado de campo esté conectado a la salida del generador.

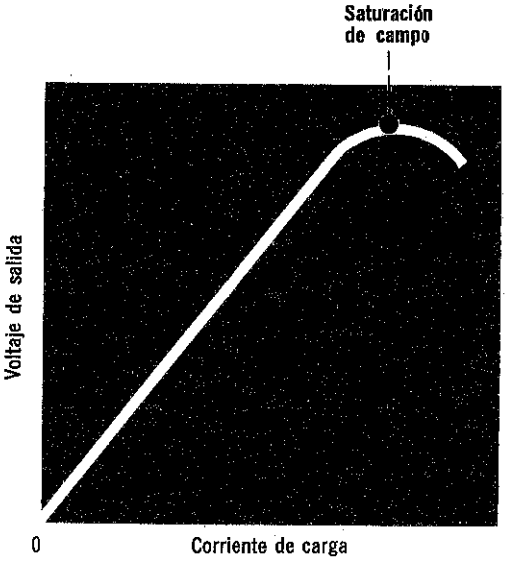
generadores en serie

Cuando el devanado de campo de un *generador autoexcitado* se conecta en *serie* con la salida del generador, a éste se le llama *generador en serie*. La corriente de excitación que atraviesa el devanado de campo de este generador es igual a la que el generador transmite a la carga. Si la carga tiene alta resistencia y, en consecuencia, toma sólo una pequeña corriente del generador, la corriente de excitación también es pequeña, lo cual significa que el campo magnético del devanado de campo es débil, de modo que disminuye el voltaje de salida del generador. En forma similar, si la carga toma una corriente elevada, la corriente de excitación también es grande, el campo magnético del devanado de campo es intenso y el voltaje de salida del generador es alto. Nótese que, en un generador en serie, los cambios en la corriente de carga afectan considerablemente al voltaje de salida del generador. Por lo tanto, se dice que un generador en serie tiene *mala regulación de voltaje* y, como resultado, los generadores en serie no son convenientes para cargas fluctuantes.



En un generador en serie, el devanador de campo está conectado en serie con la salida del generador. Por lo tanto, la misma corriente que fluye por la carga fluye a través del devanado de campo.

La gráfica de la página siguiente ilustra la manera cómo el voltaje de un generador en serie varía al aumentar la corriente de carga. Nótese que, al aumentar la corriente de carga, el voltaje de salida también aumenta hasta cierto punto. Después de ese punto, los demás aumentos de corriente producen una disminución del voltaje de salida.



Puesto que el voltaje de salida varía con la corriente de carga, un generador en serie tiene mala regulación de voltaje

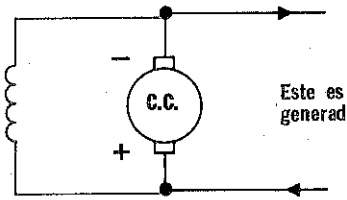
generadores en serie (cont.)

El punto donde el voltaje deja de aumentar corresponde al de *saturación magnética* del devanado de campo. Según se recordará de lo estudiado en el volumen 3, esto ocurre cuando el material del núcleo, que en este caso son las piezas polares, está completamente magnetizado. El flujo magnético ya no puede aumentar, no importa cuánto aumente la corriente en el devanado. Así, el voltaje de salida desciende más allá de este punto y no permanece constante en su valor máximo, lo cual se debe a que la caída de voltaje ha aumentado en el devanado de campo y las bobinas de armadura. La caída de voltaje es mayor porque la corriente aumenta, pero el voltaje generado permanece invariable. Además, el voltaje de salida es igual al voltaje generado, menos la caída de voltaje interno; en consecuencia, el voltaje de salida debe disminuir. Otra razón de que el voltaje de salida disminuya es que la reacción de armadura aumenta. Esto se describirá posteriormente.

Otra desventaja del generador en serie, además de su mala regulación de voltaje, estriba en que el devanado de campo debe estar devanado con alambre que pueda conducir sin peligro toda la corriente de carga y sin sobrecalentarse. Esto requiere un alambre con área transversal relativamente amplia.

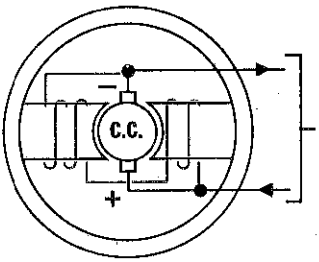
generadores con derivación

Cuando el devanado de campo de un generador autoexcitado está conectado *en paralelo* con la salida del generador, a éste se le llama *generador con derivación*. El valor de la corriente de excitación en un generador con derivación depende del voltaje de salida y la resistencia del devanado de campo. Generalmente, la corriente de excitación se mantiene en algún valor entre 0.5 y 5 por ciento de la corriente total producida por el generador.



Este es el símbolo de un generador con derivación

Este es el diagrama de un generador con derivación



Salida del generador

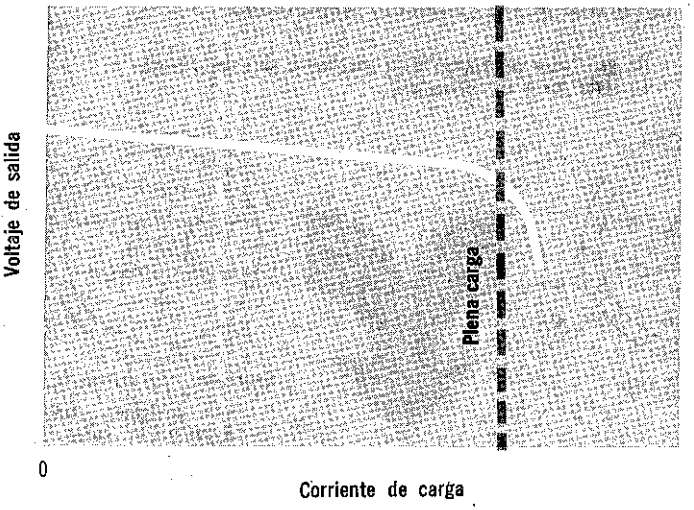
En un generador con derivación, el devanado de campo está conectado en paralelo con la salida del generador, o en sus terminales. Por lo tanto, la corriente de excitación depende del valor del voltaje de salida y de la resistencia del devanado de campo

El voltaje de salida de un generador con derivación que funciona a velocidad constante en condiciones variables de carga es mucho más estable que el voltaje de salida de un generador en serie. Sin embargo, sigue ocurriendo cierto cambio en el voltaje de salida. Este cambio ocurre porque, cuando la corriente de carga aumenta, la caída de voltaje (IR) en la bobina de armadura aumenta y esto hace que disminuya el voltaje de salida. Como resultado, la corriente en el devanado de campo disminuye y se reduce el campo magnético, con lo cual el voltaje de salida disminuye aún más. Si la corriente que toma la carga es mucho mayor que aquella para la cual se diseñó el generador con derivación, la caída del voltaje de salida es extrema. Sin embargo, para cambios de corriente de carga dentro del rango planeado, la caída del voltaje de salida con aumentos de carga, no es demasiado grande.

generadores con derivación (cont.)

El hecho de que su voltaje de salida se reduzca al aumentar la corriente de carga, hace que los generadores derivados tengan la cualidad de *autoprotegerse*. Si la carga se conectara súbitamente "en corto", el voltaje de salida descendería hasta cero. Por lo tanto, no habría corriente de excitación a través del devanado de campo, de manera que, el generador, en efecto, sería inoperante.

El voltaje de salida de un generador con derivación desciende gradualmente al aumentar la corriente de carga dentro de su rango de funcionamiento normal



El voltaje de salida se reduce drásticamente si la corriente de carga aumenta por arriba del valor nominal a plena carga

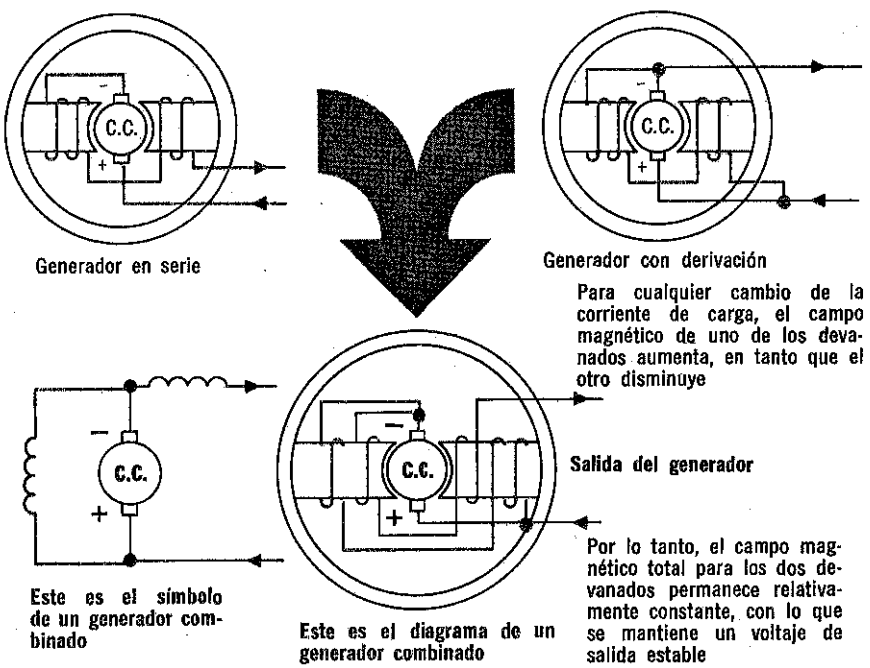
Hasta cierto punto, el cambio de la salida de tensión de un generador con derivación con cambios en la corriente de carga, también es causado por un cambio de *reacción de armadura*, de la misma manera como se vio que sucedía en los generadores en serie. La reacción de armadura se estudia posteriormente.

En comparación con los generadores en serie, la corriente de excitación en generadores con derivación es muy pequeña. Por lo tanto, se puede usar alambre delgado para el devanado de campo. En generadores con derivación ordinarios, las bobinas de campo constan de muchas espiras de alambre de pequeño diámetro.

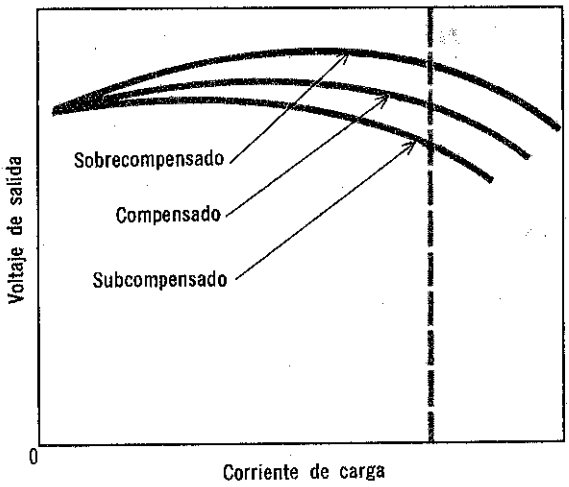
generadores combinados

Tanto los generadores en serie como los que tienen derivación tienen la desventaja de que, cuando la corriente varía de cero a carga normal, hacen que su voltaje de salida también cambie. En un *generador en serie,* los aumentos en la corriente de carga originan *aumentos* en el voltaje de salida; pero cuando se trata de un *generador con derivación,* los aumentos de la corriente de carga originan la *disminución* del voltaje de salida. Muchas aplicaciones en las cuales se usan generadores, requieren que el voltaje de salida del generador sea más estable que el suministrado por un generador, ya sea en serie o con derivación. Una forma de transmitir este tipo de voltaje estable es usar un generador con derivación que tenga alguna forma de *regular el voltaje.* La regulación de voltaje de los generadores se estudia posteriormente. Otro medio para suministrar un voltaje estable es mediante un *generador combinado.*

Un generador combinado tiene devanador de campo tanto en serie como en derivación.



Un generador combinado tiene un devanado de campo conectado *en paralelo* con la salida del generador, en la misma forma que un generador con derivación; también tiene otro devanado de campo conectado *en serie* con la salida del generador, igual que un generador en serie. A veces, a los generadores combinados se les conoce como *generadores en serie con derivación.*



Siempre que un generador combinado está compensado, sobrecompensado, o subcompensado, el voltaje de salida desciende en forma pronunciada, cuando la corriente de carga excede hasta la corriente de plena carga normal

generadores combinados (cont.)

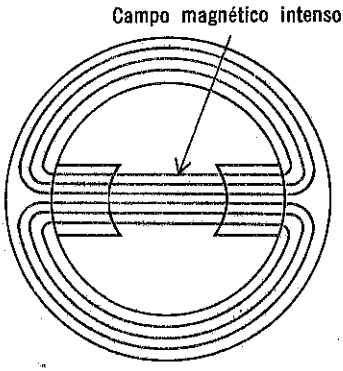
Los dos devanados del generador combinado están diseñados de tal manera que sus campos magnéticos *se ayudan*. Así pues, cuando la corriente de carga aumenta, la corriente que pasa por el devanado de campo en derivación disminuye, reduciendo la intensidad de su campo magnético. Pero el mismo aumento en la corriente de carga ocurre en el devanado de campo en serie, aumentando la intensidad de su campo magnético.

Cuando hay el número adecuado de espiras en el devanado en serie, el aumento de intensidad de su campo magnético *compensará* la disminución de intensidad del campo magnético del devanado en derivación. Por lo tanto, la intensidad total del campo magnético combinado, permanece casi invariable, de manera que el voltaje de salida se conserva constante. En realidad, no es posible que los dos devanados de campo se compensen exactamente. Siempre habrá algún cambio en el voltaje de salida al variar la corriente del generador de su valor sin carga a su valor a carga plena. Sin embargo, según se puede observar en la gráfica, en los generadores combinados prácticos, el voltaje de salida tiene el mismo valor sin carga y a carga plena y el cambio que ocurre entre la no carga y carga plena es menor que un 5 por ciento aproximadamente. Se dice que un generador con estas características es *combinado normal.*

Para algunas aplicaciones, el devanado en serie se hace de tal manera que sobrecompense al devanado en derivación. Entonces el voltaje de salida del generador aumenta gradualmente al aumentar la corriente de carga sobre el rango de funcionamiento normal. Este generador está *sobrecombinado* o *sobrecompensado*. En forma similar, el devanado en serie puede diseñarse de manera que subcompense al devanado en derivación. El voltaje de salida de este tipo de generador disminuye gradualmente al aumentar la corriente de carga. A este tipo de generador se le llama *subcombinado* o *subcompensado*.

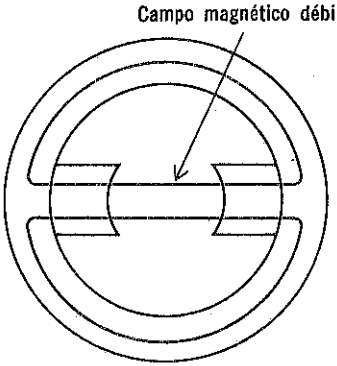
arranque de generadores autoexcitados

En el instante en el que se arranca cualquier generador, tanto su voltaje de salida como su corriente son nulas. Por lo tanto, cabe preguntar cómo es posible que un generador autoexcitado comience a desarrollar un voltaje, si no hay voltaje ni corriente en el devanado de campo, ¿cómo se produce en el devanado el campo magnético que debe tener para que el generador funcione? La respuesta es: en el *magnetismo residual* de las piezas polares. Siempre que se magnetizan materiales magnéticos, *mantienen* una pequeña *parte* de ese magnetismo aun después de que se ha retirado la influencia magnetizante.



Generador funcionando
(no se muestra la armadura)

El magnetismo residual de las piezas polares hace posible arrancar a un generador autoexcitado aún cuando no fluya corriente de excitación en el devanado de campo en el instante en que se arranca el generador



Generador parado
(no se muestra la armadura)

El magnetismo residual es causado por el hecho de que aún retirando la corriente de magnetización, las piezas polares retienen cierto magnetismo

El hierro dulce, del cual se hacen las piezas polares, pierde la mayor parte de su magnetismo siempre que la corriente de excitación en el devanado de campo desciende hasta cero; por ejemplo, cuando se desconecta el generador. Sin embargo, retiene una pequeña parte de su magnetismo, manteniendo así un campo magnético *débil* en el espacio que se encuentra entre las piezas polares. Así pues, cuando el generador arranca nuevamente, las bobinas de armadura cortan las líneas de flujo de este débil campo magnético. Esto induce un pequeño voltaje en las bobinas de armadura, lo cual da al generador una pequeña salida. A su vez, la salida origina el flujo de algo de corriente de excitación y, en consecuencia, aumenta la intensidad del campo magnético, que nuevamente aumenta el voltaje inducido en las bobinas de armadura. Esta actividad continúa hasta que el generador alcanza su salida nominal. En algunos casos, pueden pasar hasta 30 segundos desde el instante en que se arranque el generador autoexcitado hasta que alcance su salida nominal.

resumen

☐ Los electroimanes que se usan para producir el campo magnético de un generador se llaman bobinas de campo. ☐ Las bobinas de campo están devanadas alrededor de las piezas polares. ☐ El generador simple tiene dos bobinas de campo y recibe el nombre de generador bipolar. ☐ Todas las bobinas de campo juntas se llaman devanado de campo. ☐ La corriente que excita al devanado de campo de un generador de c-c, debe ser de c-c. ☐ En un generador con excitación separada, la corriente de excitación proviene de una fuente externa de voltaje de c-c. ☐ En un generador autoexcitado, la corriente de excitación proviene de la propia salida del generador.

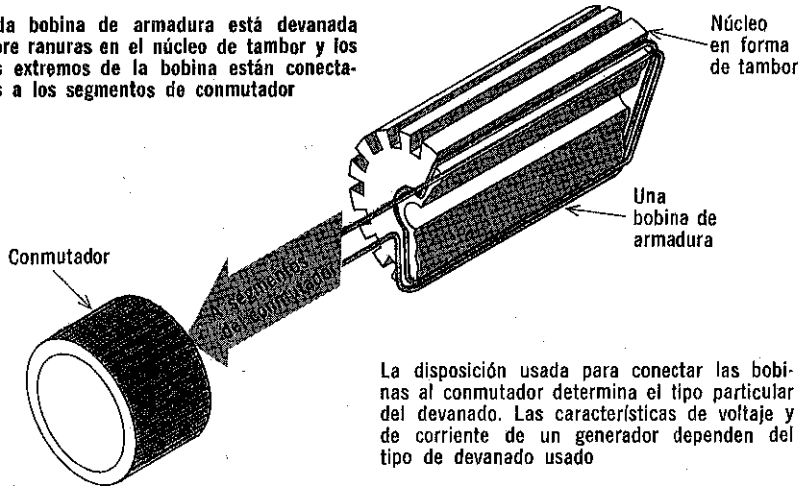
☐ Existen tres tipos de generadores autoexcitados: en serie, con derivación y combinado. ☐ En los generadores en serie, el devanado de campo está conectado en serie con la salida del generador. ☐ Los generadores en serie tienen mala regulación de voltaje. ☐ En un generador con derivación, el devanado de campo está conectado en paralelo con la salida del generador. ☐ Los generadores con derivación tienen mejor regulación y mucho menor corriente de excitación que los generadores en serie. ☐ Si la carga en un generador con derivación se conecta en corto, el voltaje de salida descenderá hasta cero. Esto le da al generador con derivación la cualidad de autoprotegerse. ☐ Un generador combinado tiene dos devanados de campo: uno conectado en serie con la salida y el otro en paralelo.

☐ Un generador combinado tiene buena regulación de voltaje y el cambio de voltaje de salida entre condiciones sin carga y plena carga es inferior a un 5 por ciento aproximadamente. ☐ Un generador autoexcitado arranca por sí mismo debido al magnetismo residual de las piezas polares.

preguntas de repaso

1. ¿Qué es *corriente de excitación*?
2. ¿Por qué debe ser c-c la corriente de excitación en un generador de c-c?
3. ¿Qué es un *generador autoexcitado*? ¿Qué es un generador excitado separadamente?
4. ¿Por qué tiene un generador en serie mala regulación de voltaje?
5. ¿Por qué se dice que los generadores con derivación se autoprotegen?
6. ¿Por qué debe usarse alambre grueso para el devanado de campo de los generadores en serie?
7. ¿Qué es un generador combinado?
8. ¿Qué es un generador sobrecombinado? ¿Qué es un generador subcombinado?
9. Cuando se arranca un generador autoexcitado, ¿por qué tarda algún tiempo en alcanzar su salida nominal?
10. En un generador combinado, ¿se ayudan o se oponen los campos magnéticos de los dos devanados?

devanado de armadura



La disposición usada para conectar las bobinas al conmutador determina el tipo particular del devanado. Las características de voltaje y de corriente de un generador dependen del tipo de devanado usado

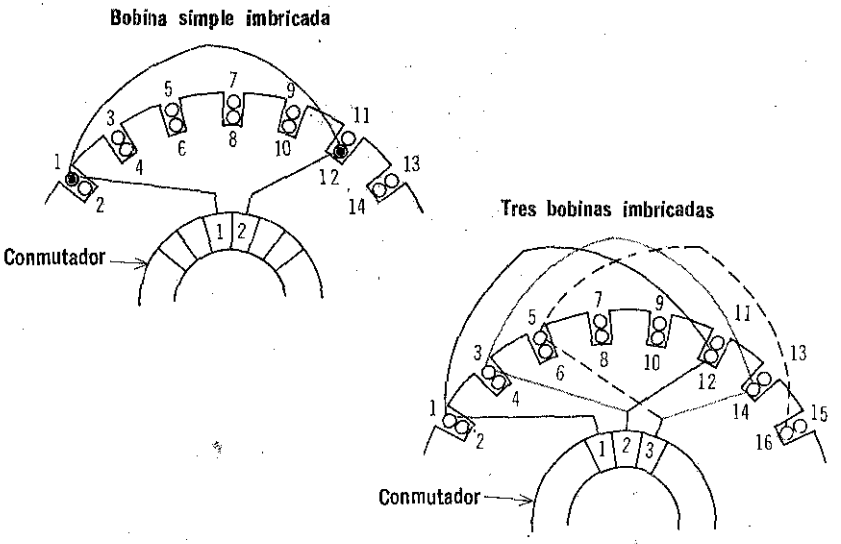
Igual que las bobinas de campo combinadas constituyen el devanado de campo, las bobinas de armadura combinadas se llaman *devanado de armadura.* Las terminales de la bobina de armadura se conectan a diferentes segmentos en el conmutador, en donde su fem es recogida por las escobillas. Las bobinas de todas las armaduras modernas de generadores están devanadas sobre un núcleo de hierro que tiene la forma de un tambor. El núcleo suministra un medio para hacer girar las bobinas y, al mismo tiempo, es una buena trayectoria de baja reluctancia para las líneas de flujo del campo magnético establecido por el devanado de campo. El núcleo tiene ranuras longitudinales y las bobinas están devanadas en estas ranuras. Los dos lados de cada bobina se hallan instalados en diferentes ranuras. En la figura puede apreciarse un núcleo típico de tambor con una bobina de armadura de tres espiras.

Las terminales de las bobinas de armadura se pueden conectar a los segmentos del conmutador de diversas maneras. La disposición que se use determina en gran medida las características de voltaje y corriente del generador. Para toda aplicación práctica, todas las diversas disposiciones se pueden dividir en dos tipos principales: *devanados imbricados* y *devanados ondulados.* Cuando se combinan los devanados imbricados y los ondulados, resulta un *devanado ancas de rana,* debido a la forma que resulta.

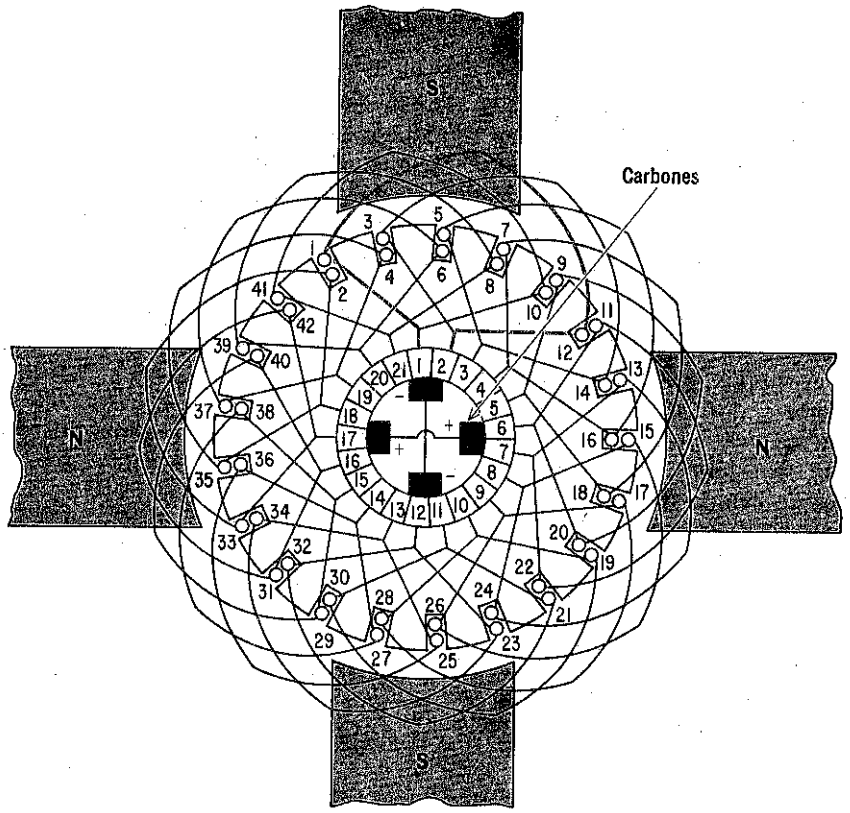
En cualquier devanado de armadura, ya sea imbricado u ondulado, cabe recordar un punto importante en el sentido de que cada bobina está devanada sobre el núcleo de tal manera que los dos lados de la bobina están separados la misma distancia que en el campo, separa a un polo norte de un polo sur. Por lo tanto, siempre que un lado de bobina esté a la mitad de un polo norte, el otro lado de la misma bobina estará a la mitad de un polo sur.

devanados imbricados

Los *devanados imbricados* se llaman así a causa de los diagramas de devanado, que representan las conexiones entre las bobinas de armadura y los segmentos del conmutador. En estos diagramas, cada bobina de un devanado imbricado *se encima* sobre la bobina anterior. Los dos extremos de cualquier bobina en un devanado imbricado están conectados a segmentos adyacentes en el conmutador y cada uno de ellos conecta los extremos de dos bobinas adyacentes. Esto tiene el efecto de colocar todas esas bobinas bajo pares similares de polo en paralelo. Si el devanado de campo sólo tiene un polo norte y un polo sur, esto significa que hay dos trayectorias paralelas en el devanado de la armadura. Si hay dos polos norte y dos polos sur, hay cuatro trayectorias paralelas. Esta es una característica básica de los devanados imbricados. Hay el mismo número de trayectorias paralelas a través del devanado de armadura como polos de campo haya.



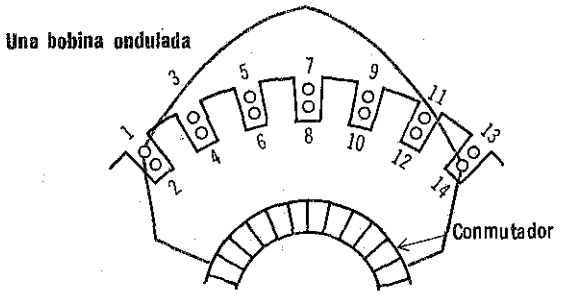
Los voltajes inducidos en las bobinas en cada una de las trayectorias paralelas son iguales y tienen la misma polaridad, de manera que no hay flujo de corriente circulante entre las trayectorias paralelas. Hay un juego de escobillas para cada par de trayectorias paralelas y estas escobillas están conectadas eléctricamente (negativo a negativo y positivo a positivo) con la salida del generador. Por lo tanto, el voltaje de salida es igual al voltaje inducido en cualquiera de las trayectorias paralelas; pero la capacidad de corriente es grande, ya que ésta se divide entre muchas trayectorias dentro del generador. Por lo tanto, los devanados imbricados sacrifican la salida de voltaje por la capacidad de corriente.



Armadura imbricada de cuatro polos

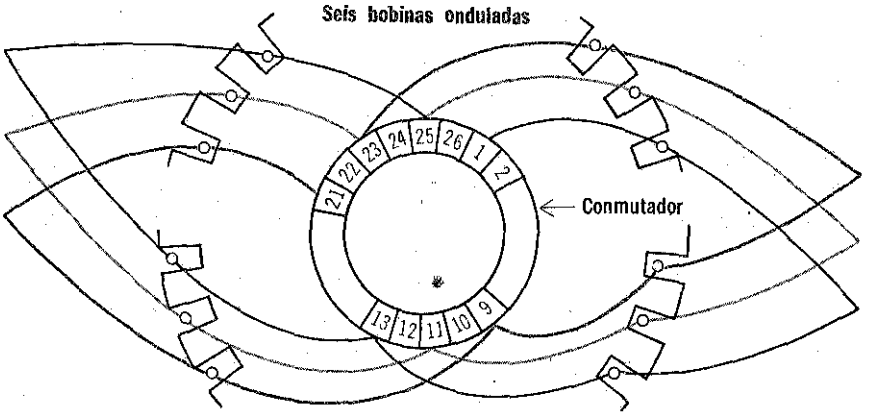
devanados imbricados (cont.)

En resumen, los devanados imbricados dividen el devanado de armadura en tantas trayectorias paralelas como polos de campo haya. Los voltajes, inducidos en las bobinas en cualquiera de estas trayectorias paralelas se suman para producir el voltaje total de esa trayectoria. Los voltajes totales inducidos en cada trayectoria son iguales y de la misma polaridad, por lo que también lo son las corrientes en cada trayectoria. Hay un juego de escobillas para cada dos trayectorias; en otras palabras, hay una escobilla por cada polo y las salidas combinadas de cada juego de escobillas constituyen la salida del generador. Como las escobillas están en paralelo, el voltaje de salida es igual que entre cualquier juego de escobillas. Sin embargo, la corriente de salida es igual a la suma de las corrientes que pasan a través de cada juego de escobillas.



devanados ondulados

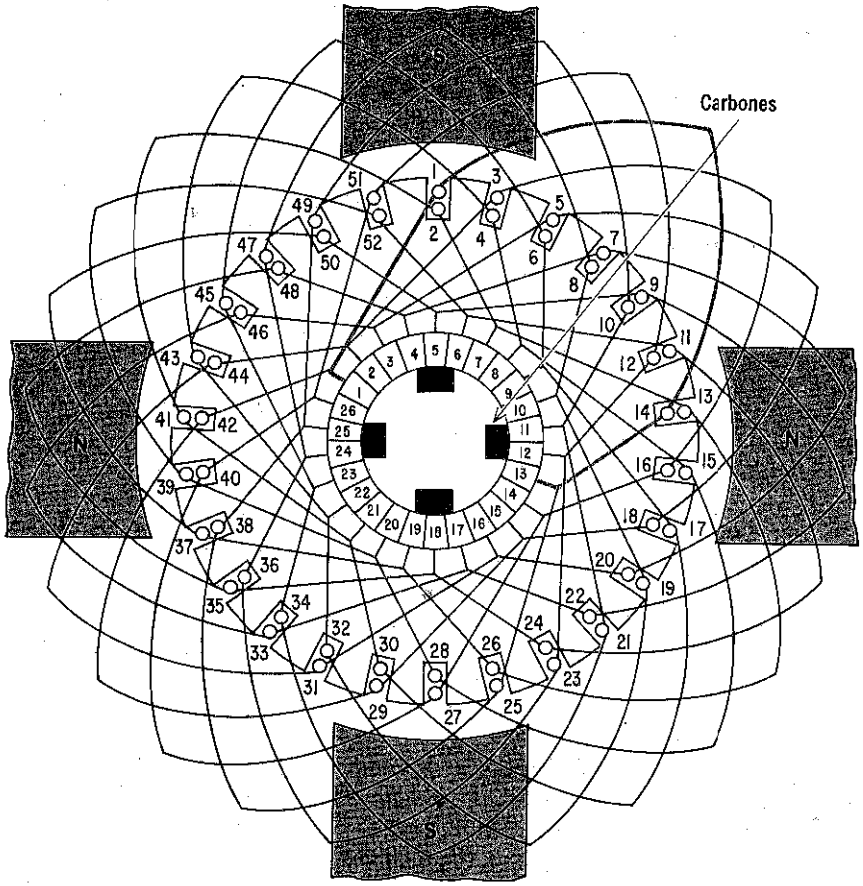
En un *devanado ondulado,* los dos extremos de la bobina de armadura no se conectan a segmentos adyacentes de conmutador, como ocurre con los devanados imbricados. En lugar de ello, el extremo de cada bobina se conecta a un segmento que se encuentra a una *distancia* de dos veces la que hay entre los polos del segmento al cual se conectó el otro extremo de la bobina: también en este caso, cada segmento de conmutador se conecta a los extremos de dos bobinas diferentes; pero las bobinas están en lados opuestos de la armadura. Esto tiene el efecto de colocar en *serie* todas aquellas bobinas bajo pares de polos similares. Por lo tanto, sólo se tienen dos trayectorias paralelas a través del devanado de armadura, independientemente del número de polos.



Cada uno de los voltajes de las bobinas se suman en cada trayectoria y, como sólo hay dos trayectorias, existen más bobinas por trayectoria que en un devanado imbricado comparable. Por lo tanto, el voltaje total inducido en cada trayectoria es relativamente alto. Sin embargo, la capacidad de corriente de un devanado ondulado es inferior a la de un devanado imbricado, debido a que en el devanado sólo hay dos trayectorias para la corriente. Por lo tanto, puede notarse que, mientras en un devanado imbricado se sacrifica el voltaje de salida por la capacidad de corriente, un devanado ondulado se sacrifica la capacidad de corriente para obtener un mayor voltaje.

devanados ondulados (cont.)

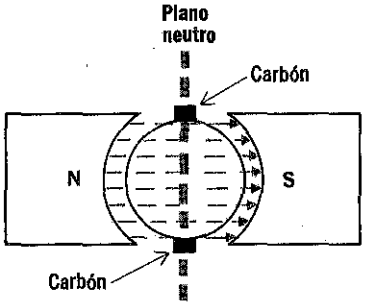
Para el mismo número y tamaño de bobinas de armadura, un devanado ondulado producirá un voltaje igual al producido por un devanado imbricado multiplicado por el número de pares de polos. Pero la capacidad de corriente disminuye en la misma proporción en que aumenta el voltaje. Para un generador simple de dos polos, no importa que se use un devanado imbricado o uno ondulado. En ambos casos, hay dos trayectorias paralelas en el devanado, de manera que el voltaje de salida y la capacidad de corriente serán iguales.



Armadura ondulada de cuatro polos

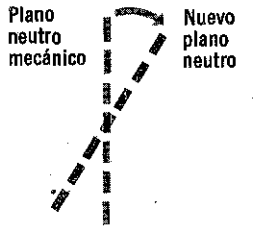
plano neutro

De lo estudiado acerca del conmutador básico, se recordará que si una escobilla hace contacto con dos segmentos de conmutador que tengan una bobina conectada entre ellos, la escobilla *conecta en corto* a la bobina. Si en ese momento se estaba induciendo un voltaje en la bobina pasará una corriente elevada a través de la bobina y probablemente la queme. Para evitar esto, sólo una bobina debe estar conectada en corto con una escobilla, o sea conmutada, cuando su voltaje inducido es igual a cero. Los puntos de su rotación, en los cuales una bobina tiene cero voltaje inducido, se encuentran a lo largo de lo que se ha llamado *plano neutro*. Como se ilustra para un generador de dos polos, el plano neutro es perpendicular a las líneas de flujo y se encuentra a la mitad de las piezas polares.



Teóricamente, el plano neutro es el punto en que las bobinas de armadura no cortan líneas de flujo y por lo tanto, no hay voltaje inducido en ellas

Durante el funcionamiento, el plano neutro tiende a desplazarse a una nueva posición. Debido a ésto, el plano neutro teórico recibe el nombre de plano neutro mecánico o geométrico



La reacción de armadura y la autoinducción de las bobinas de armadura tienden a desplazar la posición del plano neutro

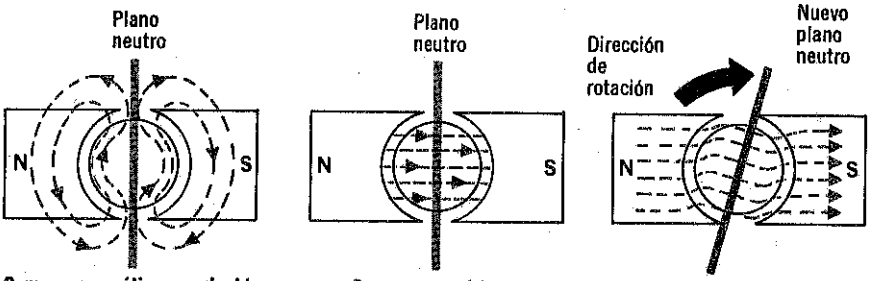
El plano neutro es el mismo para todas las bobinas, y cada vez que la armadura completa una rotación, cada bobina pasa dos veces a través de él. Por lo tanto, teóricamente tendrá lugar una conmutación perfecta si las escobillas del generador se encuentran localizadas en el plano neutro. Sin embargo, en la práctica, la posición del plano neutro tiende a desplazarse cuando el generador está girando. Por lo tanto, las escobillas tienen que moverse a la nueva posición del plano neutro, o debe hacerse algo para evitar que el plano se desplace. Las dos causas de este desplazamiento de plano neutro son: la *reacción de armadura* y la *autoinducción* de las bobinas de armadura.

reacción de armadura

Cuando un generador suministra corriente a una carga, la misma corriente que fluye a través de la carga fluye también a través del devanado de armadura. Esto hace que se forme un *campo magnético* alrededor de los conductores del *devanado de armadura*, ya que la corriente que pasa a través de cualquier conductor producirá un campo magnético. Los campos magnéticos que están alrededor de cada uno de los conductores del devanado de armadura se combinan para producir un campo magnético general. Así, hay *dos* campos magnéticos en el espacio que se encuentra entre las piezas polares del generador. Uno de ellos es el campo que produce la corriente en la armadura y el otro es el campo magnético principal, originado por el devanado de campo.

Una característica de los campos magnéticos es que sus líneas de flujo no se pueden cruzar, en cambio se *combinan* para producir un nuevo campo magnético total. El campo total de cada uno de los dos campos que hay entre las piezas polares del generador, tiene una dirección según se ilustra en la figura. Este es el campo que realmente cortan las bobinas de armadura cuando ésta gira. Aún se induce un voltaje cero en cada bobina cuando no corta líneas de flujo; pero los dos puntos donde esto ocurre, no se encuentran ya en el mismo lugar que tenían cuando sólo se consideraba el campo magnético del devanado de campo. Los dos juntos han sido *desplazados* en la misma dirección que la rotación de la armadura. Por lo tanto, esto significa que el plano neutro se ha desplazado en dirección de la rotación de armadura.

El desplazamiento del plano neutro depende de la intensidad del campo magnético que la corriente de carga origina alrededor del devanado de armadura. Cuanto mayor sea la corriente de carga, mayor será el desplazamiento del plano neutro. Sin embargo, la dirección de desplazamiento siempre es la misma que la dirección de rotación. Nótese, pues, que si la carga es constante, las escobillas se pueden colocar en la nueva localización del plano neutro y quedar allí. Pero si la carga en el generador cambia frecuentemente, las escobillas deben cambiarse constantemente a la nueva posición que toma el plano neutro, para obtener una buena conmutación. Obviamente, esto constituye un procedimiento laborioso.



Campo magnético producido por la corriente a través de devanado de armadura

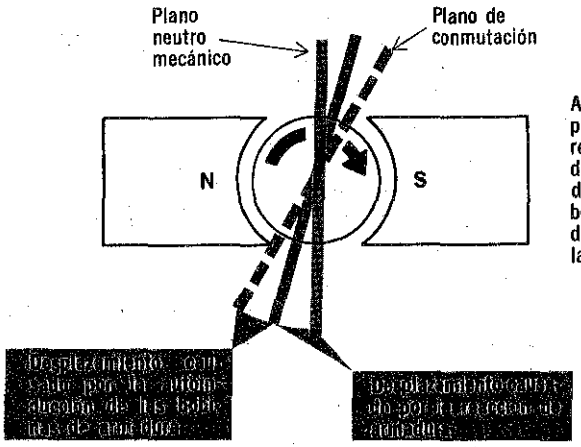
Campo magnético producido por el devanado de campo

Campo magnético combinado

autoinducción en bobinas de armadura

Ya se ha estudiado cómo se desplaza el plano neutro en la dirección de rotación por efecto de la reacción de armadura. Si se conoce la magnitud exacta de este desplazamiento y se fuesen a colocar las escobillas del generador, en consecuencia, aún no se obtendría conmutación perfecta. Esto se debe a la *autoinducción* de las bobinas de armadura.

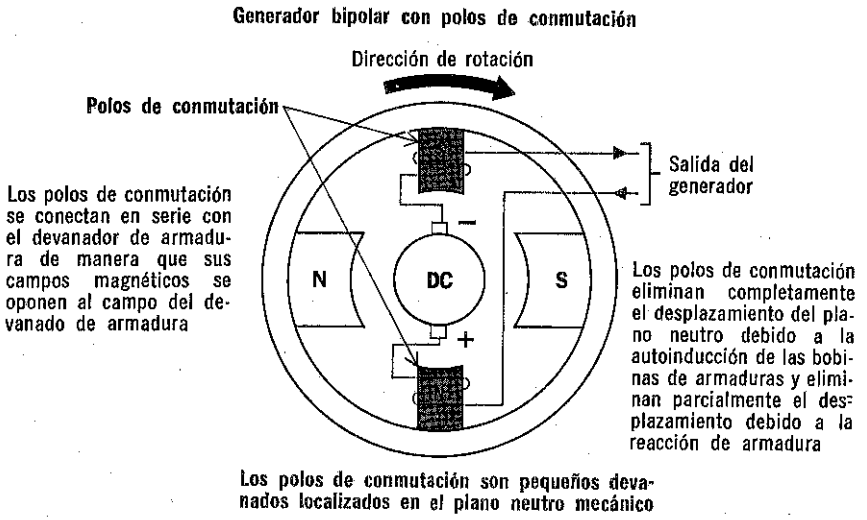
Cuando la corriente que pasa a través de una bobina tiende a descender hasta cero en el punto donde la bobina no corta líneas de flujo, el campo magnético de alrededor de la bobina se desvanece. Cabe recordar de lo estudiado en el volumen 3 que esto origina un voltaje autoinducido, cuya polaridad tiende a mantener la circulación de la corriente en lugar de permitirle reducirse instantáneamente a cero. Por lo tanto, este voltaje autoinducido aparece entre los segmentos del conmutador cuando las bobinas están en lo que supuestamente es el plano neutro. Aunque el voltaje autoinducido es pequeño, puede producir una gran corriente debido a la baja resistencia de los segmentos del conmutador, escobillas y bobinas. Esto significa que el voltaje en una bobina no es igual a cero, sino hasta cierto tiempo después de que la bobina ha pasado el punto en su rotación donde no corta líneas de flujo.



Además del desplazamiento del plano neutro causado por la reacción de armadura, existe un desplazamiento adicional causado por la autoinducción de las bobinas de armadura. Ambos desplazamientos se efectúan en la dirección de rotación.

Efectivamente, el voltaje autoinducido ha *desplazado* aún más al plano neutro, en la dirección de rotación. A esta nueva posición del plano neutro suele llamársele *plano neutro eléctrico* o *plano de conmutación.*

Si las escobillas del generador están localizadas sobre este plano, resultará una buena conmutación. Igual que en el caso de reacción de armadura, el desplazamiento del plano neutro, originado por autoinducción de las bobinas de armadura, es proporcional a la corriente de carga. Por lo tanto, según se ha mencionado anteriormente, sólo puede obtenerse buena conmutación cuando la corriente de carga es constante o si la posición de las escobillas cambia cada vez que lo hace la corriente de carga.



interpolos

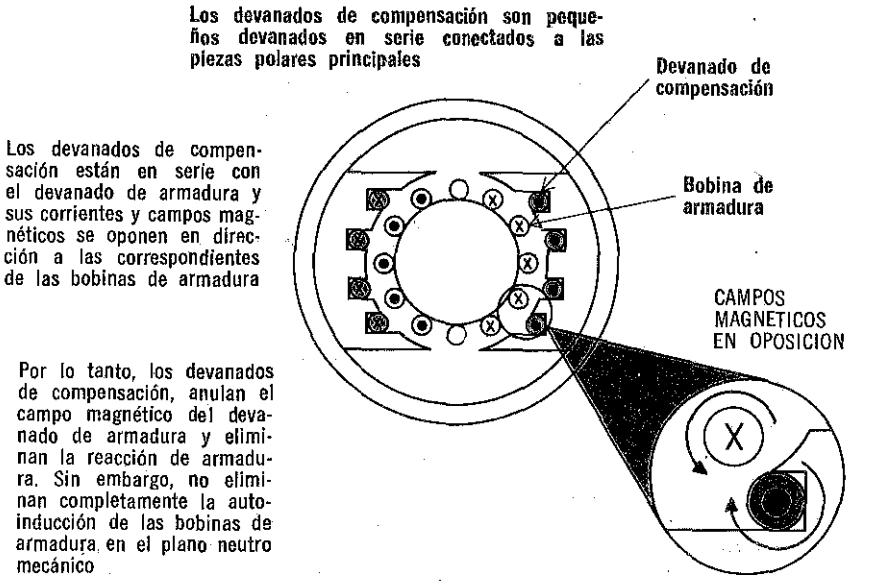
Cuando un generador ha de suministrar una corriente de carga variable, debe hacerse algo para evitar que el plano neutro se desplace al cambiar la corriente de carga. Sin esta medida de precaución, se requeriría el cambio constante de la posición de las escobillas. Una manera de mantener el plano neutro efectivo cerca del plano neutro mecánico, a pesar de los cambios a la carga, es mediante polos intermedios o *interpolos*. Como se ilustra en la figura, los interpolos son pequeños devanados localizados en el plano neutro mecánico. Los devanados están enrollados sobre piezas polares que forman parte de la cubierta del generador. Los devanados de los interpolos están conectados en serie con el devanado de armadura, de manera que la corriente de carga hace que se produzca un campo magnético en cada interpolo.

Las direcciones de estos campos magnéticos son tales que *anulan* al campo magnético que rodea a las bobinas de la armadura en la proximidad de los interpolos. Por lo tanto, en ausencia del campo magnético que desaparece, no hay autoinducción de las bobinas de armadura cuando llegan al plano neutro. Así pues, no hay desplazamiento del plano neutro debido a autoinducción de las bobinas de armadura. Para cumplir su función, los interpolos deben tener la polaridad correcta, que es la opuesta a la de la fem de autoinducción. Si se aplica la regla de la mano izquierda, resulta que la polaridad del interpolo debe ser igual a la del *polo principal que le sigue*, en dirección de la rotación.

Los interpolos son autorregulables. Cuando aumenta la corriente de carga, el plano neutro tiende a desplazarse hacia la dirección de rotación; pero, al mismo tiempo, el campo de los interpolos aumenta en intensidad, oponiéndose así al desplazamiento.

devanados compensadores

Los interpolos no pueden eliminar la reacción de armadura debido a que están localizados sólo en el plano neutro en tanto que la reacción de armadura tiene lugar en toda ella; pero si se colocaran interpolos en toda la armadura, la reacción de ésta se eliminaría. En efecto, esto es lo que se hace cuando se emplean *devanados compensadores,* que son pequeños devanados colocados en las piezas polares principales. Los devanados compensadores se conectan *en serie* entre sí y con el devanado de la armadura.



Como se puede apreciar en la figura, en los devanados compensadores, la corriente fluye en dirección *opuesta* a la de las bobinas de armadura que están frente a ellos. Como las corrientes son opuestas, la dirección de los campos magnéticos de los devanados compensadores y las bobinas de armadura también lo serán, lo cual significa que el campo de los devanados compensadores anula al de las bobinas de armadura. Al anular el campo magnético de las bobinas de armadura, los devanados compensadores eliminan la reacción de armadura; mas esto no contrarresta del todo a la autoinducción de las bobinas de armadura.

Nótese que tanto los devanados compensadores como los interpolos eliminan la mayor parte del desplazamiento del plano neutro que de otra manera originaría los cambios de carga. Algunos generadores de carga variable tienen devanados compensadores; en tanto que otros están provistos de interpolos. En generadores muy grandes, o en los que tienen amplia variación de carga, los devanados compensadores y los interpolos suelen usarse juntos.

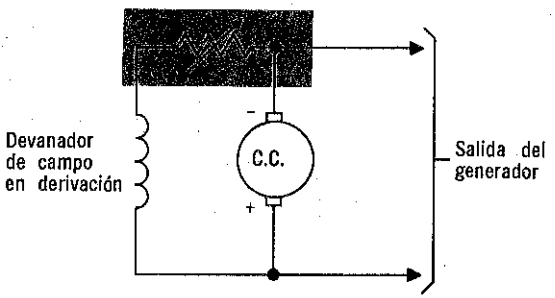
regulación del voltaje del generador

El voltaje que produce cualquier generador de c-c depende de tres factores: 1) el número de espiras de conductor que estén en serie en la armadura; 2) la velocidad a que gira la armadura y, 3) la intensidad del campo magnético. Para que un generador produzca una salida constante de voltaje bajo una carga variable, por lo menos uno de estos tres factores debe variarse para compensar por los cambios de voltaje que de otra manera originarían cambios en la carga. Durante el funcionamiento normal, no se pueden cambiar ni el número de conductores de la armadura, ni su disposición. También es impráctico cambiar la velocidad a que gira la armadura. Sin embargo, la intensidad del campo magnético se puede cambiar con relativa facilidad, haciendo que varíe la corriente en el devanado de campo. Como resultado, éste es el método que más se usa para regular el voltaje de salida de un generador.

A menudo se usan reguladores de voltaje en los generadores con derivación

Cuando se usan con generadores con derivación, los reguladores de voltaje funcionan como resistores variables en serie con el devanado de campo. Automáticamente ajustan la corriente de campo para compensar por cambios en el voltaje de salida del generador

Regulador de voltaje



Ya se ha explicado cómo los generadores cambinados producen un voltaje relativamente constante debido a que su corriente de campo se ajusta automáticamente para compensar cambios en la corriente de carga. Mediante dispositivos auxiliares o circuitos adicionales llamados *reguladores de voltaje*, puede hacerse que los generadores tengan voltajes de salida aún más estables que los de los generadores combinados. Los reguladores de voltaje varían considerablemente en tipo y diseño; pero todos cumplen dos funciones básicas: *sienten* el voltaje de salida del generador y hacen que *varíe* la corriente en el devanado de campo en respuesta al voltaje de salida. Así pues, si el regulador "siente" que el voltaje se ha reducido, la corriente de campo aumenta para que el voltaje tenga nuevamente su valor normal. En forma similar, si el voltaje de salida se eleva, el regulador disminuye la corriente de campo. Normalmente, los reguladores de voltaje controlan la corriente de campo ya sea haciendo variar una *resistencia* en serie con el campo o bien otra que esté en paralelo con el campo.

En muchos casos, el resistor regulador se ajusta manualmente para obtener la lectura correcta del medidor. Para grandes generadores que suministran corrientes muy altas, se usan dispositivos de resistencia especiales. Uno de éstos es el *regulador de pila de carbono*.

resumen

☐ En un devanado imbricado, el devanado de armadura se divide en tantas trayectorias paralelas como polos de campo haya. Se usa un conjunto de escobillas para cada dos trayectorias. ☐ Los devanados imbricados sacrifican la salida de voltaje por capacidad de corriente. ☐ En un devanado ondulado, todas las bobinas de armadura bajo pares de polos similares, están en serie. Por lo tanto, sólo hay dos trayectorias paralelas en la armadura. ☐ Los devanados ondulados sacrifican la capacidad de corriente por el voltaje.

☐ El plano neutro es el punto en la rotación de una armadura, donde el voltaje inducido es cero. ☐ Cuando un generador está funcionando, el plano neutro tiende a desplazarse como resultado de la reacción de armadura y de la autoinducción de las bobinas de armadura. ☐ La reacción de armadura la causa el campo magnético que la corriente de carga crea en el devanado de armadura. ☐ La reacción de armadura desplaza el plano neutro en la misma dirección que la rotación de armadura. ☐ La autoinducción de las bobinas de armadura evita que el voltaje de la bobina se reduzca instantáneamente hasta cero cuando la bobina no corta líneas de flujo. ☐ El plano neutro se desplaza aún más en dirección de la rotación por causa de la autoinducción de las bobinas de armadura. ☐ La nueva posición del plano neutro que produce la reacción de armadura y la autoinducción de las bobinas de armadura se conoce como plano neutro eléctrico. ☐ Se tiene una buena conmutación cuando las escobillas del generador están localizadas en el plano neutro eléctrico.

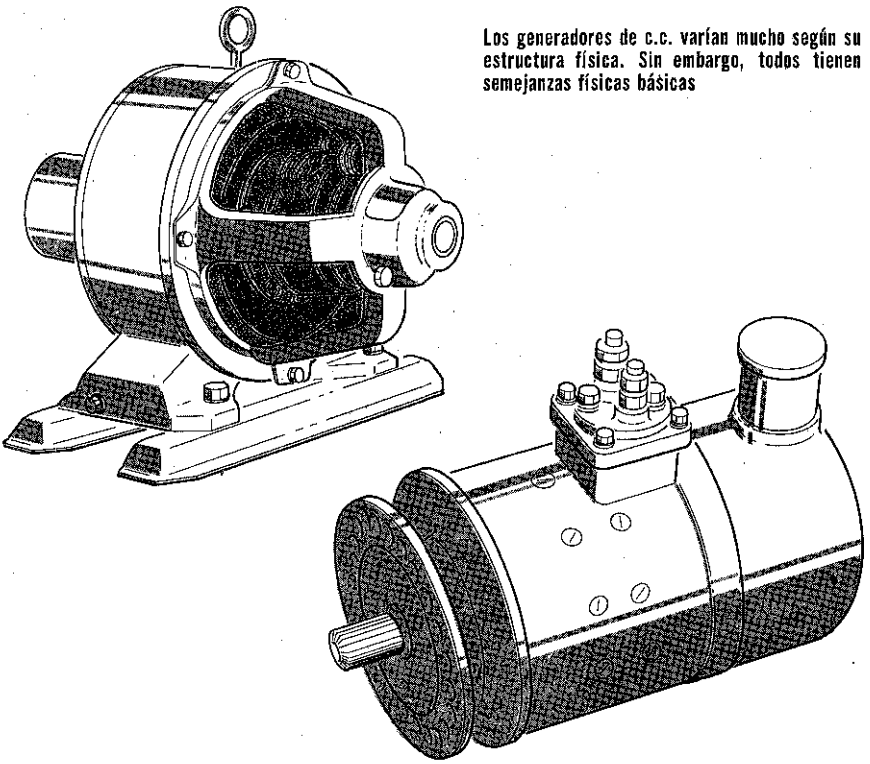
☐ Los interpolos son pequeños devanados localizados en el plano neutro mecánico, los cuales sirven para compensar la autoinducción de las bobinas de armadura. ☐ Los devanados compensadores son pequeños devanados colocados en las piezas polares principales. Compensan la reacción de armadura. ☐ Los reguladores de voltaje sirven para mantener estable un voltaje de salida en un generador.

preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son las características básicas de un devanado imbricado?
2. En general, ¿tiene mayor capacidad de corriente un devanado imbricado o un devanado ondulado?
3. ¿Cuál es el plano neutro mecánico?
4. ¿Qué es una *reacción de armadura*?
5. ¿Puede eliminarse la reacción de armadura manteniendo constante la corriente de carga?
6. ¿Qué es el *plano neutro eléctrico*?
7. ¿En qué forma afecta la autoinducción de las bobinas de armadura al plano neutro eléctrico?
8. ¿Para qué sirven los interpolos?
9. ¿Qué son los *devanados compensadores*?
10. Si el voltaje de salida de un generador tiende a aumentar, ¿qué debe hacerse a la corriente en el devanado de campo para mantener constante el voltaje?

estructura

Ya se han descrito los principios de operación de los generadores de c-c. Se conocen las partes básicas de un generador, la función de cada una de estas partes y la relación que cada parte tiene con el funcionamiento general del generador. Esencialmente, lo que se ha aprendido es el *funcionamiento eléctrico* de un generador de c-c. La *estructura física,* sólo se ha tratado muy brevemente. A menudo se comprenderá que no sólo conviene saber cómo funciona eléctricamente un generador, sino que se puedan identificar sus diversas partes y familiarizarse con su estructura física.

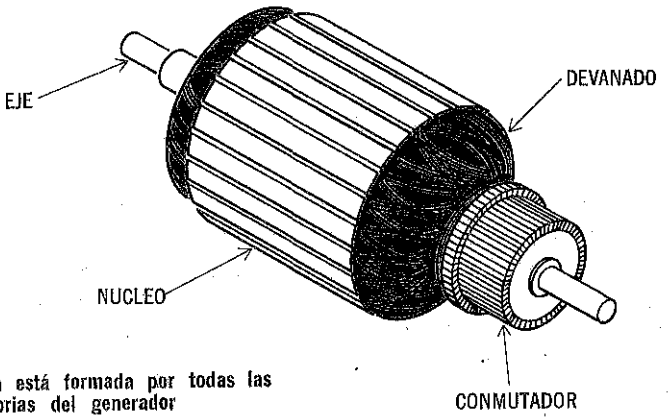


Los generadores de c.c. varían mucho según su estructura física. Sin embargo, todos tienen semejanzas físicas básicas

De lo estudiado en este volumen, se conoce la descripción de los detalles de estructura de los numerosos tipos de generadores de c-c actualmente en uso. Sin embargo, existen similitudes físicas básicas entre prácticamente todos los generadores. Debido a esto, si se sabe cómo está construido un generador típico, se tendrá una buena idea acerca de la estructura física de la mayor parte de otros. Los materiales y métodos que intervienen en la construcción de un generador típico de c-c, por lo tanto, se describen en las páginas que siguen.

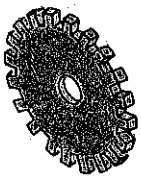
armadura

La armadura, o conjunto de armadura, como se le llama algunas veces, consta de todas aquellas partes rotatorias del generador. Estas partes son el *eje* o flecha de armadura, el *núcleo de armadura, el devanado de armadura* y el *conmutador*. Como se ilustra, el núcleo y el conmutador están montados sobre el eje. El devanado está enrollado sobre el núcleo, en ranuras, y los extremos de cada una de las bobinas que constituyen el devanado están conectadas con los segmentos del conmutador. Aunque no se ilustra, existe una parte que debe montarse en el eje de armadura. Este dispositivo sirve para conectar la armadura con su *fuente impulsora*. Generalmente, esta conexión es un engrane o un conjunto de banda y polea. O bien, puede acoplarse directamente al eje motor de la fuente.

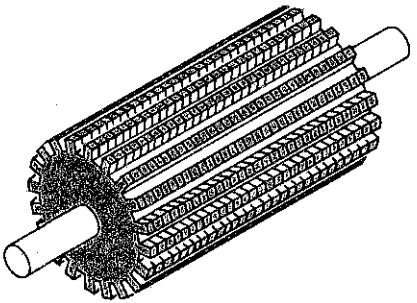


La armadura está formada por todas las partes giratorias del generador

El núcleo de la armadura tiene forma de tambor o cilíndrica, y es de acero dulce; no es de una pieza, sino que se compone de muchas láminas delgadas que reciben el nombre de *laminación* o *laminaciones*. Se cubre la laminación con un barniz aislante, y luego todas las láminas se prensan para formar el núcleo completo. Cada lámina tiene muescas en la orilla y, cuando las láminas se combinan para formar el núcleo, las muescas quedan alineadas de manera que el núcleo presenta ranuras perimetrales. La razón de que el núcleo sea laminado es reducir pérdidas debidas a *corrientes parásitas*, que, según se recordará (volumen 3) son corrientes inducidas en un material conductor cuando éste corta líneas de flujo magnético. Las laminaciones tienen el efecto de reducir grandemente el área donde puedan fluir las corrientes parásitas, lo cual significa que la resistencia del material al flujo de corriente parásita aumenta considerablemente.



Una laminación del núcleo



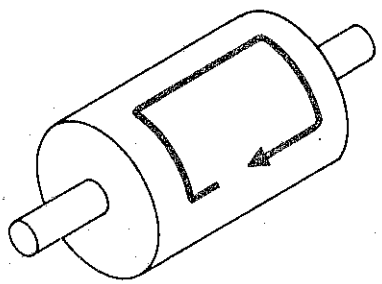
Núcleo laminado montado sobre el eje de armadura

El núcleo de armadura está laminado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas internas y está hecho de acero al silicio para reducir las pérdidas por histéresis

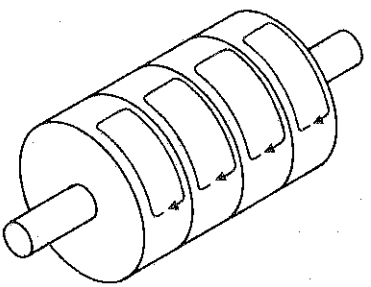
armadura (cont.)

Para reducir las *pérdidas por histéresis* del núcleo que, según se recordará (volumen 3), se presentan debido a las inversiones de magnetización del material del núcleo, de hecho están *atrasadas* respecto a las inversiones de corriente; prácticamente todos los generadores tienen núcleos hechos de acero dulce al silicio. Una característica de este material es que sus pérdidas por histéresis son bajas.

El eje del generador es una varilla de acero duro, acabada con superficie de contacto pulida. El método para montar el núcleo y el conmutador sobre el eje varía mucho de un generador a otro.

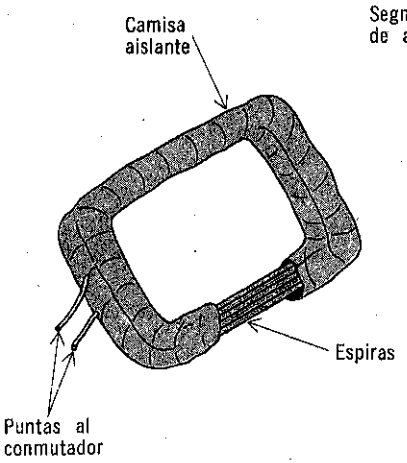


Corrientes parásitas en núcleo sólido

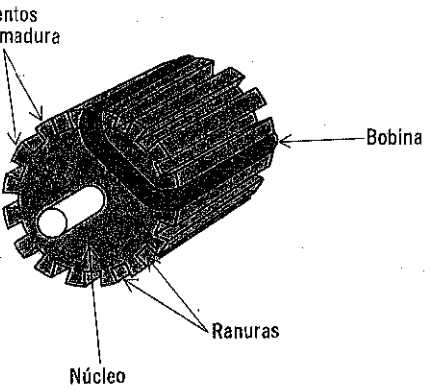


Corrientes parásitas en núcleo laminado

Al laminar el núcleo, las corrientes parásitas se dividen en muchas corrientes pequeñas, disminuyendo así grandemente las pérdidas por corrientes parásitas



Cada bobina consiste en una o más espiras devanadas dentro de una camisa aislante común



Las bobinas están devanadas en ranuras del núcleo de armadura

devanado de armadura

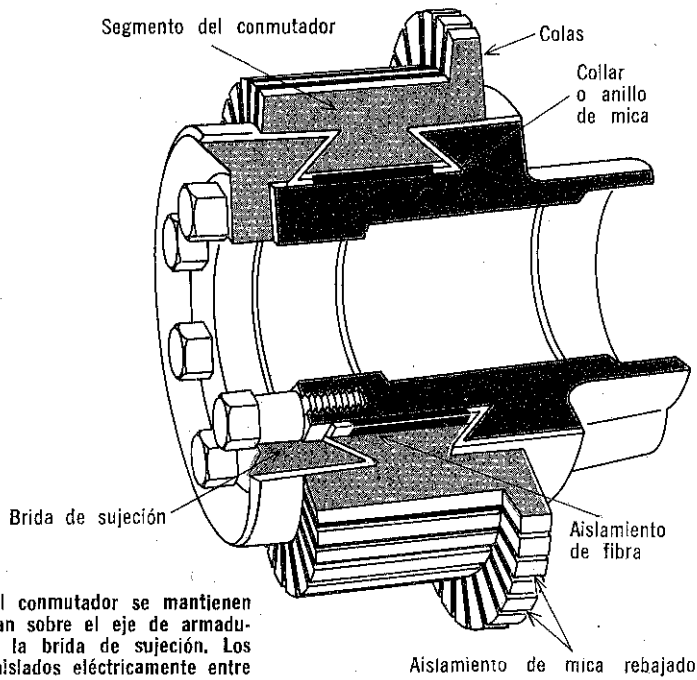
Cada una de las bobinas que constituyen el devanado de armadura está aplicada alrededor del núcleo de armadura y los lados de las bobinas están asentados en ranuras del núcleo. En muchas armaduras, las bobinas se forman primero en un molde u horma y luego se colocan sobre el núcleo. A esto se le llama *devanado de forma*. Todas las espiras de una bobina se *encintan* en un forro aislante común y cada bobina sólo tiene *dos puntas* para conectarse al conmutador.

Las partes externas del núcleo reciben el nombre de *segmentos de armadura* y el número de segmentos de armadura entre ambos lados de la bobina se relaciona directamente con el número de polos del generador. La razón es que, según se recordará, para que haya un voltaje inducido máximo, ambos lados de la bobina deben estar separados la misma distancia que separa los polos adyacentes del generador. Así pues, si se tienen 24 segmentos de armadura y ambos lados de cada bobina están separados por 12 segmentos, el generador es de dos polos. En forma similar, si hay 24 segmentos de armadura y los lados de la bobina están separados 6 segmentos, se trata de un generador de 4 polos. Dividiendo el número total de segmentos de armadura entre el número de los que hay entre los lados de la bobina, se puede determinar el número de segmentos para los cuales se devanó la armadura.

Para mantener fijas las bobinas, se colocan cuñas de material aislante en las ranuras del núcleo. En algunos generadores, se aplican también bandas de acero alrededor de la armadura para evitar que las bobinas sean expulsadas por la fuerza centrífuga.

el conmutador

El conmutador se compone de segmentos individuales de cobre tirado a mano que tienen la forma que aparece en la figura. Cada uno de los segmentos está ensamblado en una forma cilíndrica y se fijan por medio de una *brida de sujeción*. Los segmentos se colocan en un espacio cuneiforme entre las dos mitades de la brida de sujeción y, entonces, los tornillos de ésta se aprietan, con lo cual los segmentos quedan rígidamente fijos. Los segmentos están *aislados* entre sí mediante hojas delgadas de *mica*. También están aislados de la brida de sujeción por medio de anillos de mica.



Los segmentos del conmutador se mantienen juntos y se montan sobre el eje de armadura por medio de la brida de sujeción. Los segmentos están aislados eléctricamente entre sí y de la brida de sujeción

Las puntas de las bobinas de armadura están conectadas a las porciones elevadas de los segmentos del conmutador, y tienen el nombre de *colas*. Algunos segmentos de conmutador no las tienen y, en estos casos, las puntas de las bobinas de armadura se conectan a unas ranuras que se hacen en el extremo de los segmentos.

La superficie del conmutador se corta y se pule para darle un acabado cilíndrico muy terso, lo cual reduce al mínimo la fricción entre la superficie del conmutador y las escobillas. Además, el aislamiento de mica se *rebaja* ligeramente de la superficie de los segmentos del conmutador, de manera que no interfiera con el funcionamiento de las escobillas.

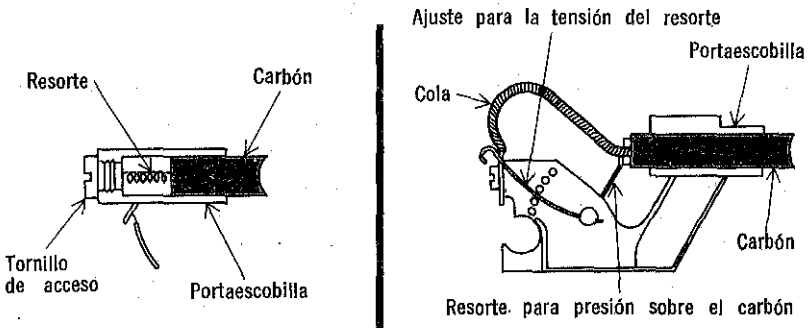
escobillas

Las escobillas transfieren la salida del generador del conmutador a un circuito externo. Normalmente, son pequeños bloques de *carbón** y compuestos de *grafito*. No debe usarse *lubricante* entre los carbones y el conmutador, ya que el grafito de las escobillas es autolubricante. Las escobillas están sujetas a portaescobillas y también se aplican a los conmutadores por medio de resortes. En muchos generadores, la presión del resorte se puede graduar. Si la presión es excesiva, las escobillas se desgastarán rápidamente; y si es insuficiente, se tendrá un mal contacto eléctrico entre ellas y el conmutador.

En muchos generadores, las escobillas están conectadas eléctricamente a los portaescobillas por medio de trenzas de cobre llamadas *colas*; pero en generadores simples, el apretado ajuste de la escobilla dentro del sujetador proporciona la conexión eléctrica. Entonces, las conexiones a un circuito externo se hacen de los portaescobillas. Aunque los portaescobillas están montados en la cubierta del generador, están aislados eléctricamente de ella. En muchos generadores, los portaescobillas no son de fácil acceso. En ese caso, los portaescobillas generalmente se conectan a *bornes* en el exterior de la cubierta del generador.

Aunque las escobillas están diseñadas para durar mucho, están construidas para desgastarse con mayor rapidez que el conmutador, debido a que es más barato y fácil substituir las escobillas que la armadura. Generalmente, se fabrican escobillas de bastante longitud, a fin de que puedan desgastarse hasta una fracción de su tamaño original sin que sea necesario substituirlas demasiado pronto. Conforme se van desgastando, el resorte las va empujando hacia el conmutador.

Los carbones generalmente están hechos de carbón y grafito



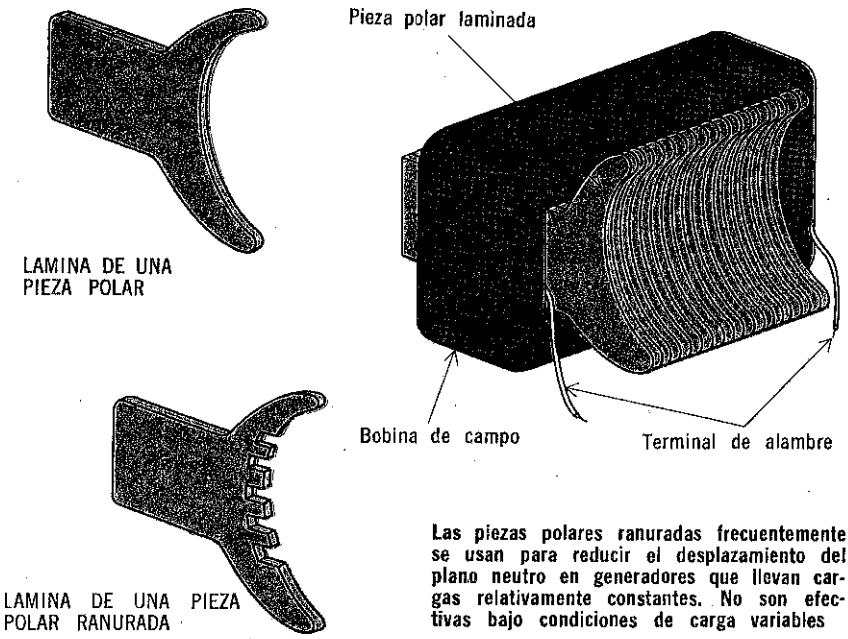
Montaje simple de un carbón **Montaje complicado de un carbón**

Los carbones están contenidos en sujetadores y presionados contra el conmutador por medio de resortes. Los buenos generadores tienen un ajuste de tensión para obtener el contacto apropiado del carbón, con el mínimo de desgaste

* *N. del T.* Por esta razón se les llama carbones.

devanado de campo

El devanado de campo de un generador se compone de todas las bobinas de campo, devanadas alrededor de sus núcleos o piezas polares. El número de bobinas de campo depende del número de polos que tenga el generador. En un generador de dos polos, hay dos; en un generador de cuatro polos, cuatro; y así sucesivamente. Están montadas en la circunferencia interior de la cubierta del generador por medio de largos tornillos avellanados que sujetan las piezas polares pasando a través de la cubierta.



Las piezas polares ranuradas frecuentemente se usan para reducir el desplazamiento del plano neutro en generadores que llevan cargas relativamente constantes. No son efectivas bajo condiciones de carga variables

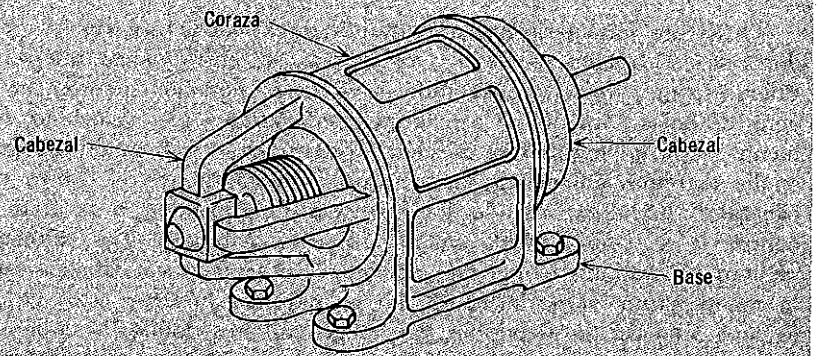
Las piezas polares generalmente están construidas con hojas de acero *laminadas,* lo cual disminuye las pérdidas por corrientes parásitas. Como se aprecia en la figura, las piezas polares tienen tal forma que se ajustan a la curvatura de la armadura. El objeto de esto es mantener lo más *pequeño* posible al *entrehierro* entre las piezas polares y la armadura, ya que el aire ofrece una reluctancia relativamente elevada a las líneas de flujo magnético.

Las bobinas de campo están devanadas alrededor de las piezas polares. Los *devanados en derivación* constan de *numerosas espiras* de alambre de cobre aislado cuyo *diámetro* es relativamente pequeño. Por otra parte, los *devanados en serie* constan de *unas cuantas espiras* de alambre de cobre *grueso,* también aislado. El alambre que se usa en los devanados en serie debe ser lo suficientemente grande para que pueda llevar toda la corriente de carga sin sobrecalentarse.

cubierta y montaje

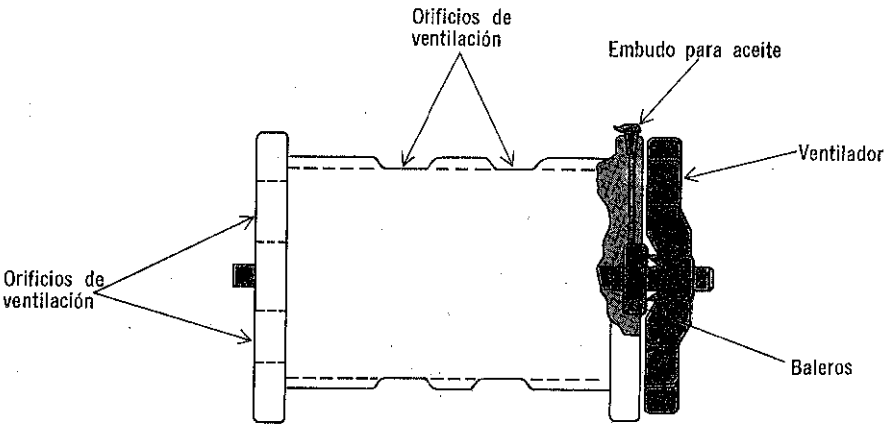
La cubierta de un generador constituye el *soporte mecánico* de las partes que forman el generador; en muchos generadores, también proporciona protección contra perturbaciones exteriores tales como polvo, suciedad y humedad. La mayor parte de las cubiertas de los generadores constan de tres partes: *una coraza* y dos *cabezales*. La coraza sostiene las bobinas de campo así como los polos intermedios, cuando existen. También sirve como parte del circuito magnético del devanado de campo. Debido a su función magnética, la cubierta del campo está hecha de hierro o acero con buenas propiedades magnéticas. El espesor de la cubierta depende del grado de soporte mecánico que debe proporcionar, así como de la intensidad del campo magnético que la atraviese. Los cabezales están montados en los extremos de la coraza y están sujetos a ella por medio de remaches o tornillos. Los cojinetes de la armadura están montados en el centro de los cabezales.

Las cubiertas de generadores pequeños constan de una coraza de campo, dos cabezales y algún tipo de base.



Debido a la amplia variedad de generadores en uso actual, todas las partes de los generadores varían en cuanto a su apariencia, de un generador a otro. A los cabezales también se les llama campanas.

Existen muchos métodos para el montaje de los generadores, y cuál se usa en cada caso depende de factores tales como tamaño y aplicación del generador y el tipo de la fuente que lo impulsa. Probablemente, el método más común de montaje es usando una base simple, la cual consta de patas u otros soportes que están unidos a la coraza central o bien forman parte de ella; el generador descansa sobre estas patas. Otro método común de montaje consiste en usar una brida o placa en el extremo impulsor del generador. La base tiene orificios para atornillarse a otra placa o superficie de montaje.



Se necesitan una lubricación apropiada y un buen enfriamiento para darle al generador una larga vida y servicio eficiente

otras características estructurales

Otras dos características importantes de la estructura de los generadores de c-c, son los *cojinetes* y los *métodos de enfriamiento* que se usen. Prácticamente, todos los generadores de tipo pequeño cuentan con cojinetes de bolas para que la armadura pueda girar a alta velocidad, suavemente y con un mínimo de fricción. Los cojinetes están metidos a presión en los extremos del eje de la armadura y montados en el centro de los cabezales. Así pues, cuando los cabezales se atornillan o se fijan a la coraza, la armadura queda sostenida por los cabezales. Los cojinetes de algunos generadores tienen *lubricación permanente* y son sellados durante la manufactura. Posteriormente, no se requiere lubricar estos cojinetes, lo cual, además, no es posible. En los generadores donde los cojinetes no están sellados, se tiene algún medio para lubricarlos periódicamente. Por lo general, esto se efectúa vertiendo grasa o aceite por un embudo montado en los cabezales.

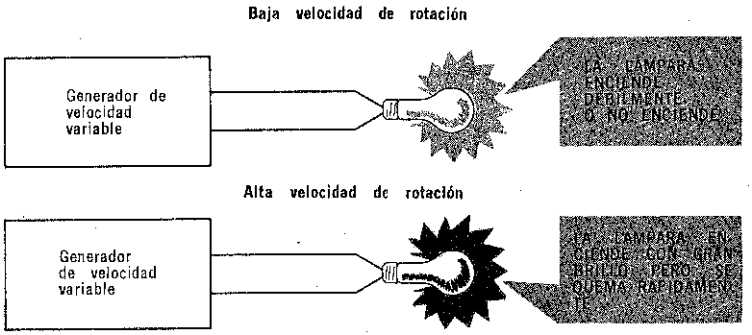
Cuando un generador funciona a toda su capacidad, produce gran cantidad de calor. El método más común para disipar este calor es por medio de *orificios de ventilación* y un *ventilador*. Los orificios de ventilación son aberturas que hay en los cabezales y en el cuerpo central, cerca de los devanados de campo. En generadores más grandes también hay orificios de ventilación en la armadura. El ventilador está montado en un extremo del eje de la armadura. Cuando la armadura gira, el ventilador impulsa aire a través de los orificios. Entonces, este aire asimila calor del interior de la cubierta del generador pasándolo por los orificios de ventilación al exterior de la máquina. Los generadores de cargas intensas también suelen estar montados en una gran área de metal conocida como *escape térmico*, que ayuda a alejar el calor producido.

regulación de un generador de velocidad variable

Se recordará que la regulación es el proceso de mantener *constante* la salida en un generador. Normalmente, esto se logra por medio de un dispositivo o circuito sensible a la salida del generador, el cual controla la corriente en el devanado de campo para compensar los cambios en la salida. Las dos causas principales de cambio o inestabilidad en la salida de un generador son los cambios en la *resistencia* de la *carga* y los cambios en la *velocidad de rotación* del generador.

El voltaje de salida de generadores con derivación y combinados impulsados a velocidades constantes no varía mucho si las variaciones de carga se encuentran dentro del rango de diseño del generador. Como resultado, sólo se tiene regulación para estos generadores cuando se desea una salida muy estable o cuando las variaciones de carga son muy grandes.

Por otra parte, *los generadores de velocidad variable* requieren generalmente de regulación. Puede comprenderse el motivo, si se considera el generador del cual está provisto un automóvil. El generador es movido por el motor del automóvil, de manera que su velocidad de rotación es muy diferente cuando la máquina funciona lentamente que cuando funciona a gran velocidad. Sin embargo, a pesar de esta amplia variación en la velocidad de rotación, el generador debe suministrar un voltaje constante de 6 o 12 volts al sistema eléctrico del automóvil. Si este voltaje variase, las luces, la bocina y de hecho todo el sistema eléctrico sería afectado. La única forma en que un generador puede suministrar un voltaje estable de 6 o 12 volts, es por medio de un dispositivo regulador. Y no solamente ese dispositivo regulador debe mantener constante el voltaje de salida sino que también debe limitar la *corriente de salida* del generador a su valor nominal máximo para evitar que el generador se queme. Así pues, generalmente se requiere regular tanto el voltaje como la corriente en un generador de velocidad variable.

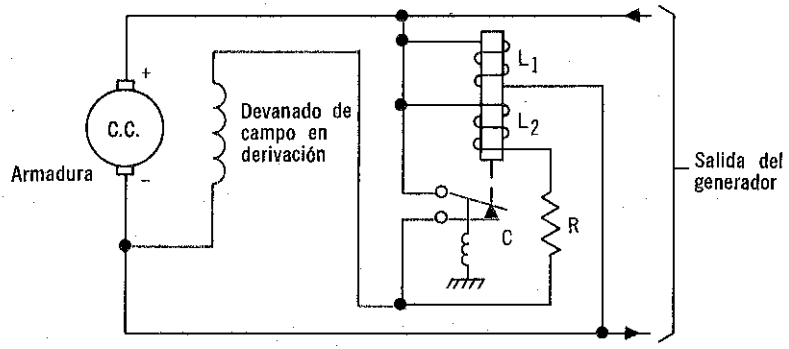


Si los generadores de velocidad variable no tuvieren reguladas sus salidas, las cargas que alimentan no podrían trabajar apropiadamente

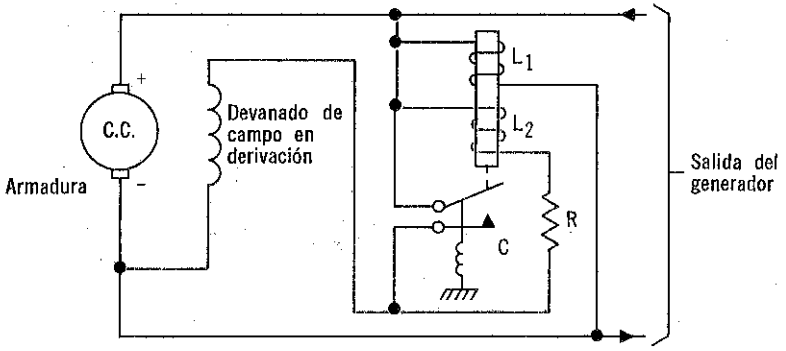
regulación de voltaje

Un circuito típico que se utiliza para regular el voltaje de salida de un generador aparece en la figura. Un lado del devanado de campo en derivación está conectado *directamente* a la salida negativa del generador. El otro lado del devanado de campo está conectado a la terminal positiva de la salida del generador ya sea a través de un resistor R y una bobina L_2 o a través de los contactos C, los cuales están controlados por el campo magnético de L_1. Así pues, el devanado de campo se encuentra directamente conectado a la salida del generador (C cerrado), o bien, está conectado en serie con R (C abierta).

Los contactos se mantienen cerrados por medio de un resorte, de manera que en el mismo instante en que el generador se arranca, los contactos se cierran y el devanado de campo queda conectado directamente a la salida del generador. Conforme el generador aumenta su velocidad, también aumentan el voltaje de salida y la corriente que fluye a través de L_1, la cual está conectada directamente a la salida del generador. Cuando el voltaje de salida llega a cierto punto, el campo magnético de L_1 es suficientemente fuerte para vencer la tensión del resorte que mantiene cerrado a C, de manera que C abre.

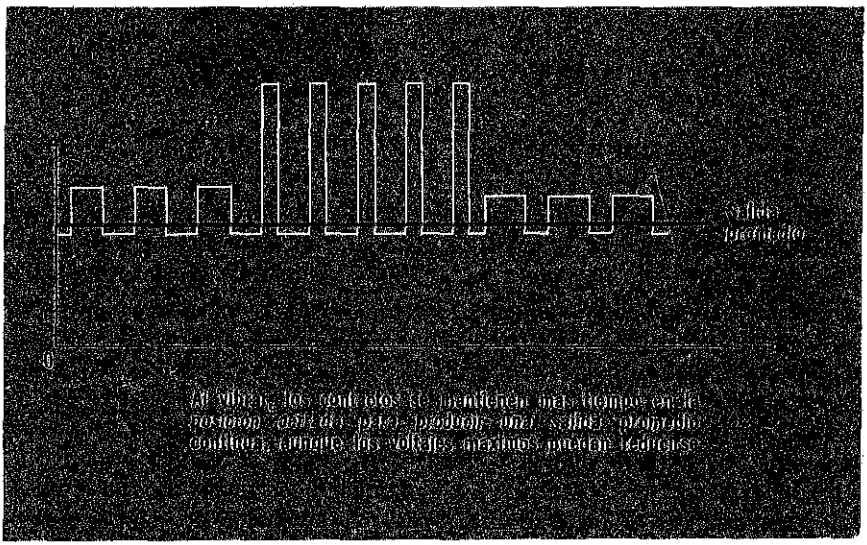


El regulador de voltaje funciona por medio de contactos que, en forma intermitente, añaden una resistencia en serie con el devanado de campo



regulación de voltaje (cont.)

La corriente de campo pasa ahora a través de R y L_2. Con el aumento de la resistencia en el circuito del campo, la intensidad de campo disminuye y se limita el aumento del voltaje de salida del generador. La corriente a través de L_2 origina un campo magnético en L_2 y éste se opone al de L_1, ya que las dos bobinas están devanadas en forma opuesta, lo cual neutraliza parcialmente la atracción magnética de L_1 sobre C y el resorte cierra nuevamente a C. Como resultado, el devanado de campo queda otra vez conectado directamente a la salida del generador, de manera que la corriente de campo asciende, aumentando el voltaje de salida que a su vez hace que C se abra debido al aumento de atracción magnética de L_1.

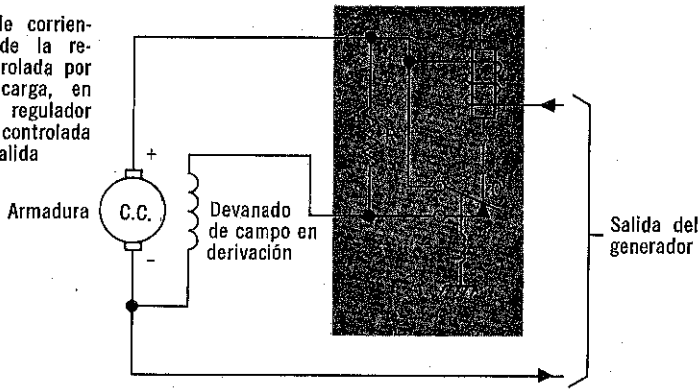


Este ciclo se verifica con gran rapidez y muchas veces por segundo, haciendo que los contactos vibren abriendo y cerrando el circuito. El voltaje de salida del generador varía ligeramente pero con gran rapidez en torno de un valor determinado por el voltaje del resorte que mantiene cerrado a C. El voltaje de salida efectivo en c-c es el valor medio entre los valores superior e inferior. Este promedio depende de si los contactos al vibrar permanecen más tiempo en una posición que en la otra. Si se mantienen cerrados un mayor tiempo del que están abiertos, el voltaje medio será mayor y viceversa. Cuando el voltaje máximo se eleva, los contactos permanecen más tiempo en la posición abierta para mantener constante la salida de voltaje. El resorte es graduable, lo cual controla la acción vibratoria de los contactos y el voltaje medio de salida del generador.

regulación de corriente

El regulador de corriente, como el de voltaje funciona a base de añadir en forma intermitente una resistencia en serie con el devanado de campo

En el regulador de corriente, la conexión de la resistencia está controlada por la corriente de carga, en tanto que en el regulador de voltaje está controlada por el voltaje de salida



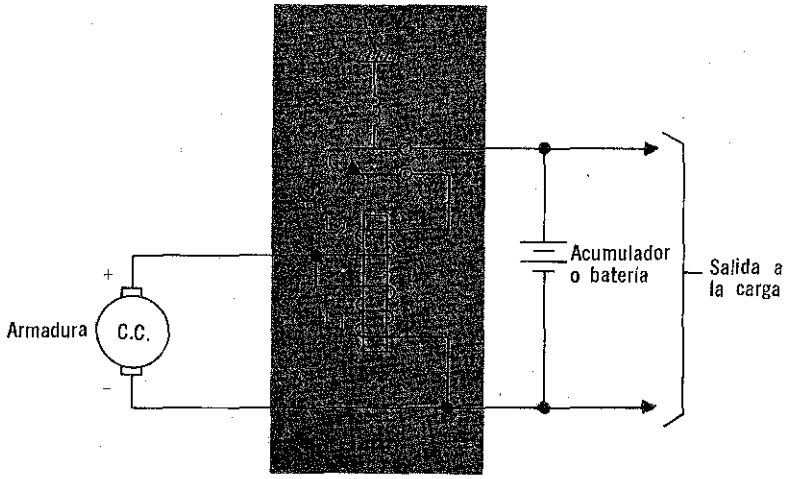
El objeto de regular la corriente de salida de un generador es evitar que la corriente exceda el valor máximo que el generador puede transmitir sin peligro. En la figura se muestra un método muy usado para regular la corriente. Esencialmente, es muy similar al método que se sigue para regular el voltaje. Según los contactos C estén abiertos o cerrados, el devanado de campo se encuentra directamente a la salida del generador o tiene resistencia R en serie con ella. La apertura y cierre de C se controla por medio de la bobina L, que está en serie con la salida del generador, de manera que lleva toda la corriente de carga.

Normalmente, los contactos C se mantienen cerrados por un resorte. Así pues, cuando el generador arranca, el devanado de campo queda conectado directamente a la salida del generador. Por lo tanto, el voltaje de salida comienza a aumentar y la corriente de carga, que fluye a través de L, también aumenta. Cuando la corriente aumenta hasta el punto donde la atracción magnética de L vence a la tensión del resorte que mantiene cerrado a C, los contactos se abren. Esto hace que la resistencia R quede en serie con el devanado de campo y que la corriente de campo y, por lo tanto, la tensión de salida, se reduzcan.

Como resultado, la corriente de carga también disminuye. La disminución en corriente reduce la atracción magnética de L y el resorte cierra nuevamente a C, lo cual conecta nuevamente al devanado de campo directamente con la salida del generador y permite que la corriente aumente nuevamente hasta que la atracción magnética de L sea suficiente para vencer al resorte y abrir a C. Como en el regulador de voltaje, este ciclo se repite continuamente y la corriente varía ligeramente por encima y por debajo del valor medio determinado por la tensión del resorte que mantiene cerrado a C.

relevador de corte de corriente inversa

Un generador de c-c de velocidad variable suele usarse en combinación con una *batería* para suministrar potencia a una carga. Cuando la velocidad del generador y, en consecuencia, su voltaje de salida es baja, la batería suministra la potencia a la carga. Y cuando el generador alcanza su velocidad y su salida nominal, suministra potencia a la carga y, al mismo tiempo, *recarga* la batería. Sin embargo, en esta disposición debe aplicarse algún método para desconectar el generador de la batería siempre que el voltaje del generador sea inferior al de la batería. De otra manera, la batería se descargaría a través de la armadura del generador y podría quemarse. Un método que suele usarse para desconectar automáticamente el generador de la batería, es por medio de un *relevador de corte de corriente inversa*. La figura ilustra un circuito típico.

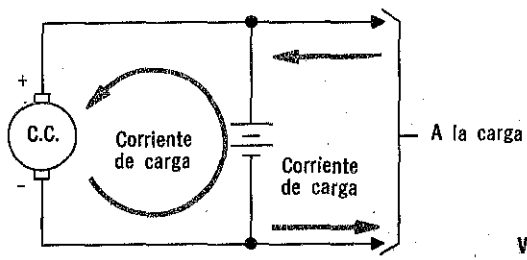


El relevador de corte de corriente inversa, conecta la salida del generador a la batería y a la carga cuando el voltaje del generador es mayor que el voltaje de la batería. Luego, desconecta al generador de la batería, y la carga cuando el voltaje del generador disminuye por debajo del voltaje de la batería

El relevador de corte de corriente inversa consta de las bobinas L_1 y L_2, ambas devanadas sobre el mismo núcleo y los contactos C, que normalmente se abren por medio de un resorte. L_1 se llama devanado de voltaje y está conectado a la salida del generador. L_2 recibe el nombre de devanado de corriente y está en serie con la salida del generador.

relevador de corte de corriente inversa (cont.)

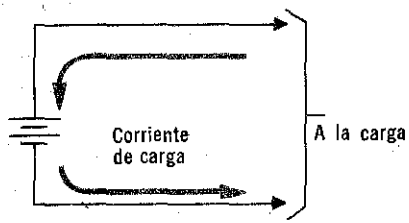
El resorte que mantiene abierto a C se ajusta de manera que, cuando el voltaje del generador es inferior al de la batería, los contactos se abren. En consecuencia, el generador queda desconectado tanto de la batería como de la carga y la batería suministra la potencia de salida. Sin embargo, en todo momento el voltaje de salida del generador está aplicado a L_1, haciendo que transmita corriente a través de la bobina y creando un campo magnético. Cuando el voltaje de salida del generador aumenta más que el de la batería, la atracción magnética de L_1 vence la tensión del resorte y cierra a C. Esto conecta el generador a la carga y al mismo tiempo hace posible que fluya corriente de carga del generador hacia la batería. La corriente del generador fluye a través de L_2 originando un campo magnético que ayuda al de L_1 y así mantiene herméticamente cerrados los contactos.



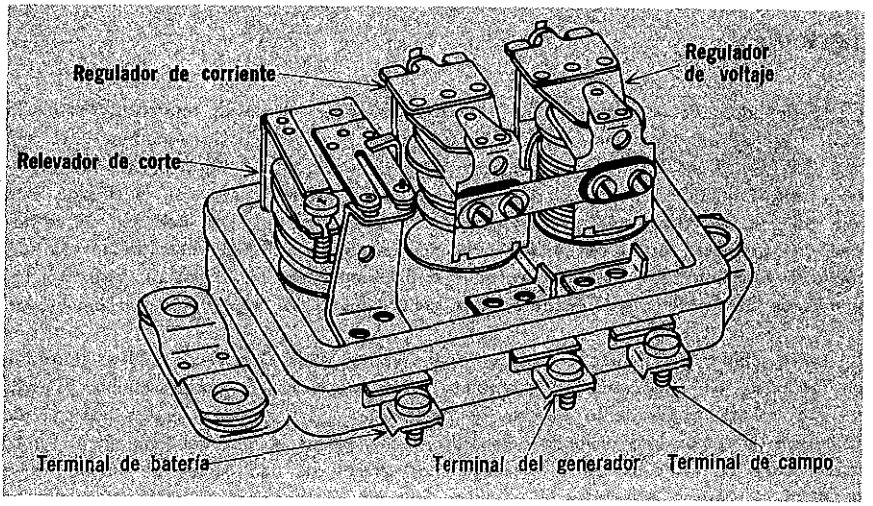
Voltaje de la batería mayor que el voltaje del generador

Esencialmente, cuando la batería está totalmente cargada, funciona como si el generador no existiera, puesto que el generador ha sido desconectado

Voltaje del generador mayor que el voltaje de la batería

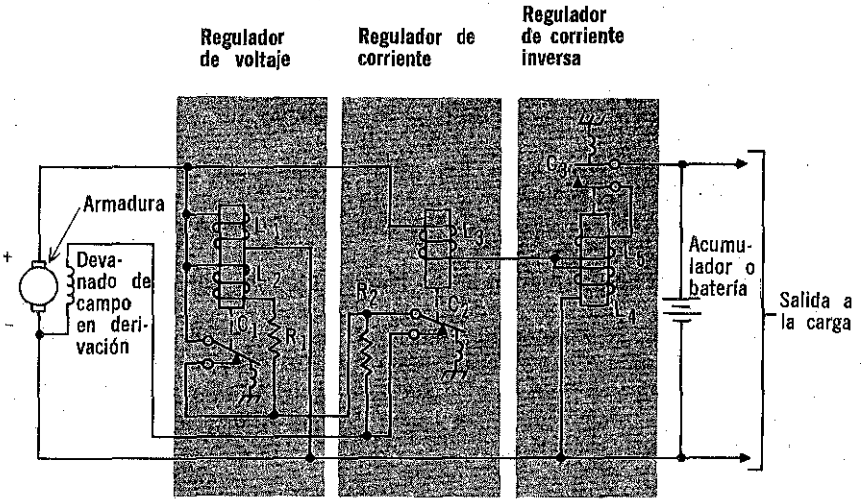


Cuando el voltaje del generador es suficientemente alto para mantener energizado a L_1, pero es inferior al de la batería, ésta comienza a descargarse a través de L_2 y el generador. Con la inversión de la corriente a través de L_2, el campo magnético que está a su alrededor se opone al de L_1, lo cual ocasiona una disminución de la atracción magnética sobre C y, como resultado, los contactos se abren, desconectando al generador de la batería y de la carga. Nótese que los contactos del relevador del corte de corriente inversa no vibran continuamente como los contactos de los reguladores de voltaje y corriente. Sólo se abren o cierran cuando el voltaje del generador aumenta, o bien, se reduce por debajo del voltaje del generador.



regulación combinada

Frecuentemente, se usa tanto un regulador de voltaje y corriente como un relevador de corte de corriente inversa para controlar la salida de un generador de velocidad variable. Generalmente, cuando se hace esto, los tres reguladores están construidos e instalados en una sola unidad. En realidad, ésta es la unidad a la que se le llama "regulador de voltaje" en un automóvil. Aunque se le llame así, en realidad consta de un regulador de voltaje, un regulador de corriente y un relevador de corte de corriente inversa.



resumen

☐ La armadura de un generador de c-c consta de todas las partes rotatorias, las cuales son: el eje de armadura, el núcleo de la armadura, el devanado de armadura y el conmutador. ☐ El eje de armadura es una barra de acero duro. ☐ El núcleo de armadura está formado de laminaciones de acero dulce aisladas entre sí. El núcleo está laminado para reducir pérdidas por corrientes parásitas. ☐ Las bobinas del devanado de armadura están devanadas alrededor del núcleo. ☐ El conmutador está formado de segmentos de cobre aislados entre sí mediante placas delgadas de mica. ☐ Las puntas de las bobinas de armadura están conectadas a los segmentos del conmutador.

☐ Las escobillas del generador generalmente son pequeños bloques de carbón y grafito en forma de un compuesto. Las escobillas están montadas en portaescobillas y están aisladas eléctricamente de la cubierta del generador. ☐ Cada una de las bobinas del devanado de campo está devanada alrededor de las piezas polares del generador. ☐ La mayor parte de las cubiertas de un generador constan de una coraza de campo hecha de hierro o acero y dos cabezales. ☐ Los cojinetes de la armadura están montados en el centro de los cabezales.

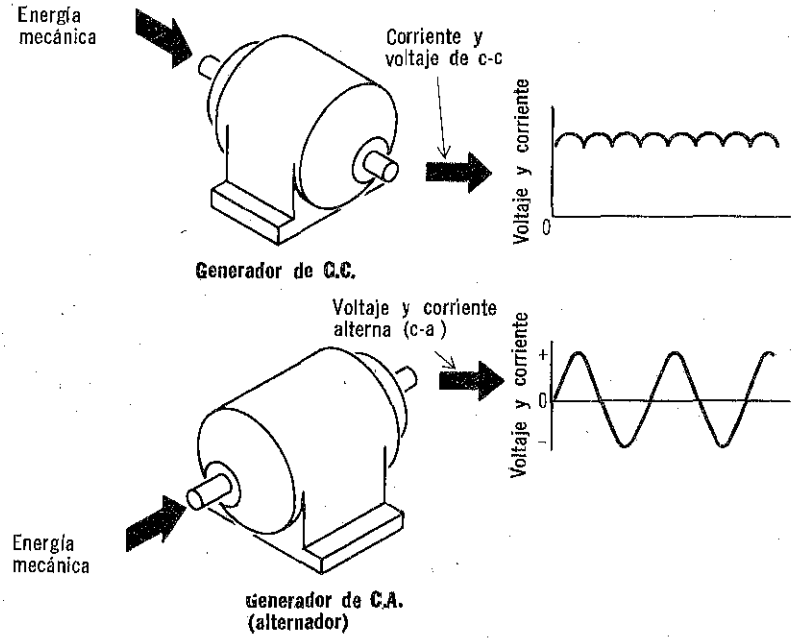
☐ Los generadores de velocidad variable normalmente deben regularse tanto en voltaje como en corriente. Regulando el voltaje, éste se puede mantener prácticamente constante a la salida, en tanto que el regular la corriente evita que la corriente de salida exceda el valor máximo que el generador puede transmitir sin peligro. ☐ Los circuitos de relevador de corte de corriente inversa son adecuados para un generador de c-c en combinación con una batería, para alimentar potencia a una carga. El circuito desconecta al generador de la batería siempre que el voltaje del generador sea inferior al de la batería.

preguntas de repaso

1. ¿Por qué es laminado el núcleo de armadura de un generador?
2. ¿Por qué se usa generalmente acero dulce al silicio para el núcleo de armadura de un generador?
3. ¿Qué es *devanado en forma*?
4. ¿Debe lubricarse el conmutador y las escobillas de un generador? ¿Por qué?
5. ¿Por qué están conformadas las piezas polares para ajustarse a la curvatura de la armadura?
6. ¿Cuál es la diferencia física que hay entre los devanados de campo en derivación y en serie?
7. ¿Puede usarse un cuerpo de campo plástico para un generador? ¿Por qué?
8. ¿Por qué los generadores de velocidad variable requieren generalmente regularse tanto en voltaje como en corriente?
9. ¿Para qué sirve un relevador de corte de corriente inversa?
10. ¿Cuáles son las dos causas principales de inestabilidad en el voltaje de salida de un generador?

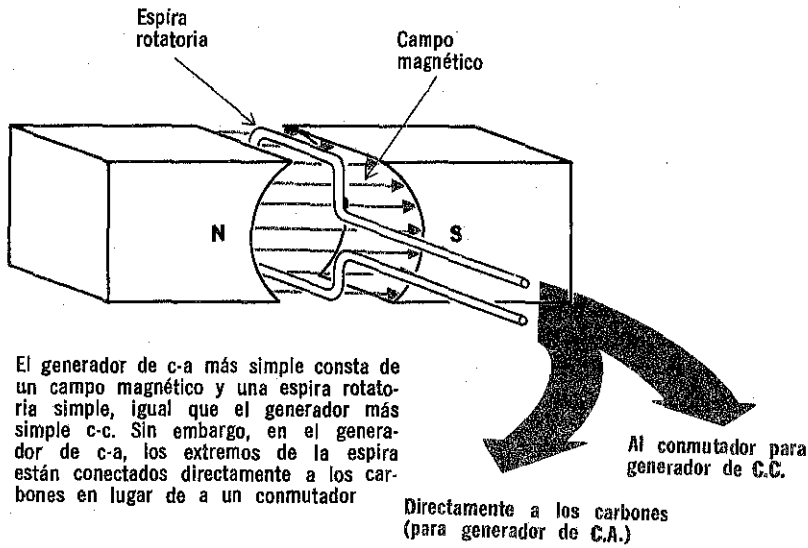
generadores de c-a (alternadores)

Aunque los generadores de c-c se usan mucho en ciertas aplicaciones, tienen *limitaciones inherentes* que los hace insatisfactorios para muchos otros usos. Algunas de estas limitaciones se deben a las características de construcción, eléctricas y físicas, de los mismos generadores de c-c, en tanto que las demás se deben a la naturaleza básica y a las propiedades de la electricidad en c-c. La mayor parte de las limitaciones debidas a los mismos generadores provienen de dificultades de conmutadores que pueden conducir grandes salidas con eficacia y eficiencia. Los generadores de c-a, según se explicará posteriormente, no tienen conmutadores y, en este aspecto, son superiores a los generadores de c-c.



Tanto los generadores de c-a como los de c-c convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Sin embargo, los generadores de c-c convierten energía mecánica en corrientes y voltajes de c en tanto que los generadores de c-a convierten la energía mecánica a voltajes y corrientes de c-a

En las siguientes páginas se estudiarán la teoría del funcionamiento y las características estructurales de los generadores de c-a y se observará que existen numerosas *semejanzas básicas* entre los generadores de c-a y los de c-c. Sin embargo, también hay muchas *diferencias significativas*, así como algunos conceptos eléctricos que resultarán enteramente nuevos para el lector. Los generadores de c-a también se llaman *alternadores*, ya que producen corriente alterna.



El generador de c-a más simple consta de un campo magnético y una espira rotatoria simple, igual que el generador más simple c-c. Sin embargo, en el generador de c-a, los extremos de la espira están conectados directamente a los carbones en lugar de a un conmutador

generador básico de c-a

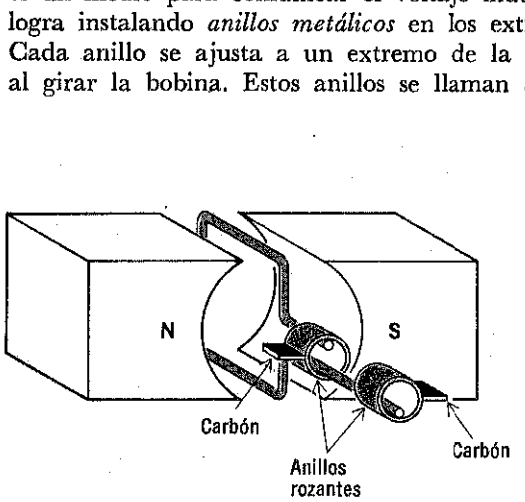
Téngase presente que el generador más simple de c-c consta de una sola espira de alambre que gira dentro de un campo magnético, más un conmutador y escobillas. Al girar la espira, se genera un voltaje de c-a entre sus dos extremos. El voltaje de c-a se convierte entonces a c-c por la acción del conmutador y las escobillas. El conmutador cambia la c-a a c-c, *cambiando* efectivamente la conexión de escobillas de un extremo a otro de la bobina rotatoria, cada vez que el voltaje inducido en la espira invierte su polaridad. Esta interrupción se efectúa de tal manera que *una escobilla* siempre está en contacto con el extremo *positivo* de la espira, en tanto que la *otra escobilla* siempre está en contacto con el extremo negativo de la espira. Por tanto, el voltaje existente entre las escobillas, que es el voltaje de salida del generador, es de c-c.

Si se eliminara el conmutador, uniendo cada escobilla conectada permanentemente con un extremo de la espira rotatoria, el voltaje que hay entre las escobillas sería exactamente al voltaje existente entre los extremos de la bobina. Como se sabe, ésta es un voltaje de c-a. Así pues, eliminando el conmutador y conectando permanentemente, en alguna forma, las escobillas a extremos opuestos de la espira, el generador básico de c-c se puede convertir en un generador simple de c-a.

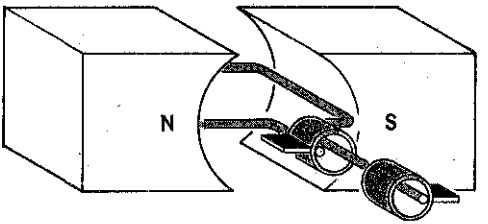
Naturalmente, los extremos de la espira no pueden conectarse directamente a las escobillas debido a que los extremos deben girar libremente con la espira; si no pudieran girar libremente, al girar la espira se torcerían hasta romperse. Así pues, de alguna manera, las escobillas deben estar conectadas permanentemente a los extremos de la bobina sin interferir con su capacidad de girar. Esto se estudia a continuación.

anillos rozantes

El conmutador de un generador de c-c cumple dos funciones: 1) convierte el voltaje inducido de c-a en c-c, y 2) constituye un medio para comunicar el voltaje inducido a las escobillas y, en consecuencia, a un circuito externo. En un generador de c-a no se requiere convertir de c-a a c-c, de manera que, en lugar de conmutador, todo lo que se necesita es un medio para comunicar el voltaje inducido a las escobillas. Esto se logra instalando *anillos metálicos* en los extremos de la bobina rotatoria. Cada anillo se ajusta a un extremo de la bobina y ambos anillos giran al girar la bobina. Estos anillos se llaman *anillos rozantes.*



Los anillos están permanentemente conectados a los extremos de la espira. Los carbones son estacionarios y mantienen contacto con los anillos rozantes al girar éstos. El voltaje inducido en la espira se transfiere entonces a los carbones y de éstos a un circuito externo



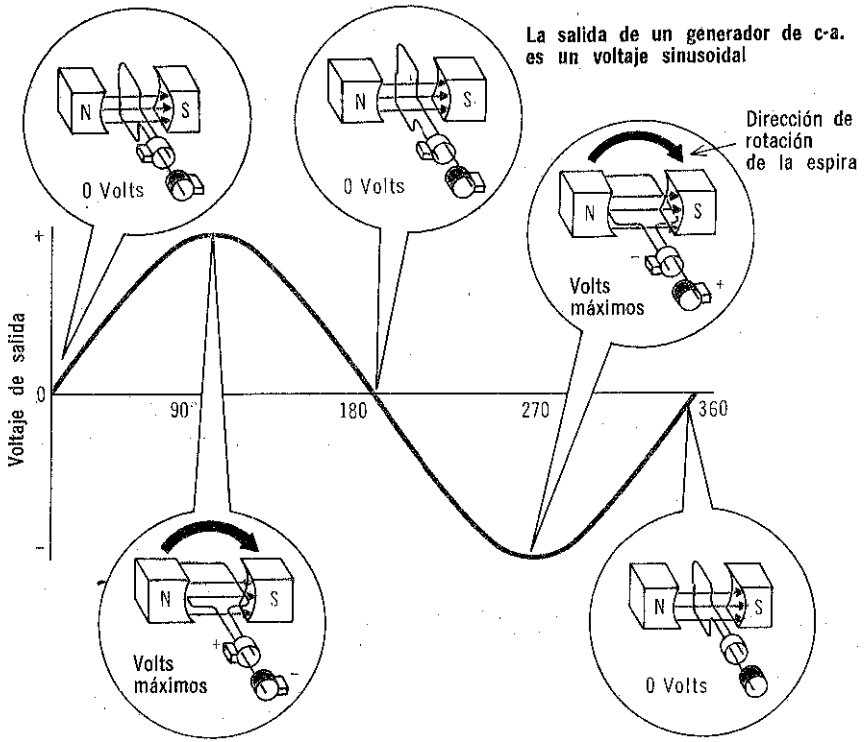
La espira y los anillos rozantes giran en tanto que los carbones permanecen estacionarios

Cada anillo rozante está *permanentemente conectado* al extremo respectivo de la bobina rotatoria, de manera que el voltaje inducido en la bobina aparece entre los anillos. Las escobillas están unidas a los anillos rozantes haciendo contacto eléctrico con ellos. Al girar la bobina, los anillos rozantes se deslizan a lo largo de las escobillas manteniendo siempre contacto eléctrico con ellas. Así pues, cada escobilla está siempre en contacto con el anillo rozante correspondiente, el cual, a su vez, está permanentemente conectado a un extremo de la bobina. El resultado es que entre las escobillas se origina un voltaje de c-a inducido en la bobina y éste puede transmitirse a un circuito externo.

generación de una salida de onda-seno

De lo estudiado en páginas anteriores, puede notarse que la salida de un generador simple de c-a de una espira es igual al voltaje inducido en la espira rotatoria. Este voltaje es igual a la *suma* de los voltajes inducidos en *ambos lados de la bobina* al cortar éstos las líneas magnéticas de flujo. Cuando *no* se cortan líneas de flujo el voltaje es nulo; y cuando se corta el número *máximo* de líneas de flujo, el voltaje es *máximo*. Como se aprecia en la figura, en un generador de c-a de dos polos, el voltaje llega a cero y alcanza un máximo de *dos veces* durante una rotación completa de la espira. Estas variaciones siguen una *onda sinusoidal*. Así pues, para una rotación completa, que corresponde a 360 grados de rotación, el voltaje generado corresponde a 360 grados eléctricos.

Si se compara la forma de onda ilustrada en la figura con la de la página 6-66, es fácil observar que el voltaje de salida del generador simple de c-a es el mismo que el inducido en la espira rotatoria de un generador simple de c-c.



Para un generador bipolar simple, un ciclo de salida de onda sinusoidal se genera cada vez que la espira hace una rotación completa. Por lo tanto, la frecuencia de este generador es la misma que la velocidad de rotación de la espira

Si la espira gira 10 veces por segundo, el voltaje de salida tiene una frecuencia de 10 cps y si gira 100 veces por segundo, la frecuencia del voltaje de salida es de 100 cps

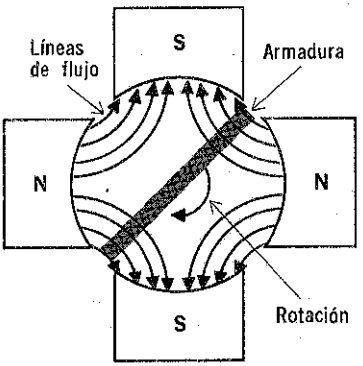
aumento del número de polos

En la forma de onda de la página anterior se puede apreciar que el voltaje de salida de un generador simple de c-a es máximo cuando los lados de la espira pasan frente a los centros de los polos. La razón es que, en estos puntos, los lados de la bobina cortan el número máximo de líneas de flujo. Si se usaran cuatro polos en lugar de dos, el voltaje de salida seguiría alcanzando su valor máximo cuando los lados de la bobina pasaran frente a los centros de los polos. Sin embargo, como el número de polos se ha duplicado, el voltaje sería máximo *cuatro veces* durante cada rotación completa de la espira en lugar de dos veces, como ocurre en el caso de un generador de dos polos.

Si entre los polos existen espacios iguales, esto significa que se genera un ciclo de una onda sinusoidal en el voltaje de salida cada vez que la espira se transporta 180 grados, o sea, la mitad de una rotación. Por lo tanto, la *frecuencia* del voltaje de salida de c-a es lo *doble* de la velocidad de rotación de la espira. Por ejemplo, si la espira gira 30 veces en un segundo, la frecuencia del voltaje es de 60 cps.

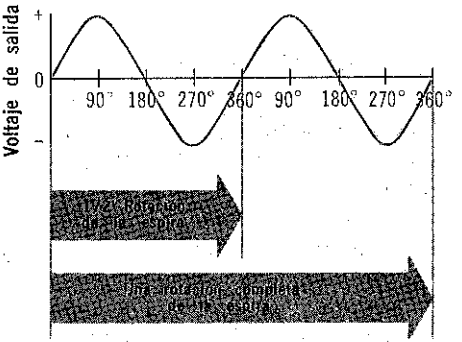
Debe ser obvio que, para determinada velocidad de rotación cuanto mayor número de polos se tenga, más alta será la frecuencia del voltaje del generador. Una relación general entre la velocidad de rotación de una sola espira, el número de polos y la frecuencia, puede establecerse de la manera siguiente: *la frecuencia es igual al número de revoluciones por segundo, multiplicada por el número de pares de polos.* Así pues, si se usan seis polos y la espira gira 10 veces por segundo, la frecuencia del voltaje de salida es 10 × 3 o 30 cps. Nótese que lo que se usa para determinar la frecuencia es el número de *pares de polos* y no el número de polos individuales.

En un generador de cuatro polos, los lados de la espira cortan el máximo número de líneas de flujo cuatro veces durante cada rotación completa de la espira



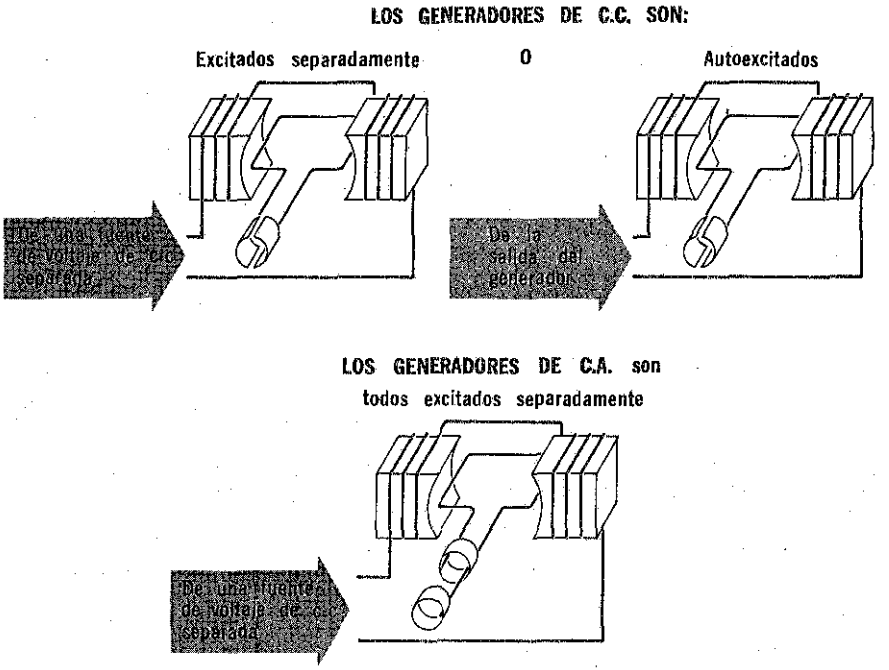
Los cuatro puntos de voltaje máximo ocurren cuando los lados de la espira pasan por los centros de los cuatro polos

En un generador de cuatro polos, se generan dos ciclos del voltaje de salida para cada rotación completa de la espira



producción del campo magnético

El campo magnético necesario para que funcione un generador de c-a es producido por un *devanado de campo,* igual que en el caso de los generadores de c-c. Téngase presente que el devanado de campo es un *electroimán* y, por lo tanto, necesita corriente para producir su campo magnético. En un generador de c-c, la corriente para el devanado de campo puede obtenerse conectando el devanado a una fuente externa de voltaje y, en este caso, el generador es un *generador excitado* separadamente. O bien, la corriente de excitación del devanado de campo puede producirse conectando el devanado a la salida del generador. Como se recordará, esto constituye un *generador autoexcitado.*



Sin embargo, en ambos casos, e independientemente de que el generador de c-c esté excitado separadamente o autoexcitado, el voltaje aplicado al devanado de campo es de c-c. Esto es necesario ya que se requiere una corriente de excitación de c-c para que el generador funcione debidamente. Como resultado, *no se puede* usar autoexcitación para los generadores de c-a, ya que su salida es de c-a. Entonces deben usarse fuentes de voltaje de c-c separadas para alimentar la corriente a los devanados de campo. En muchos generadores de c-a, la fuente de voltaje de c-c para el devanado de campo es un pequeño generador de c-c que está dentro de la misma cubierta del generador de c-a.

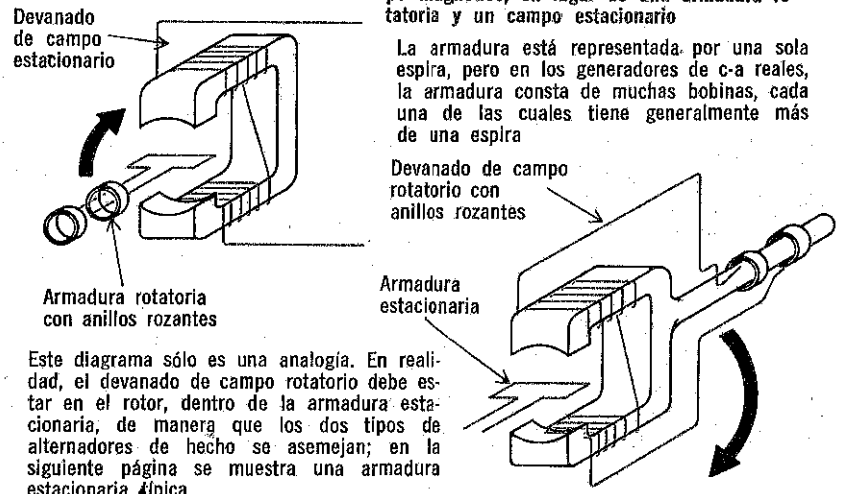
generadores de c-a con armadura estacionaria

Cuando un generador de c-a produce una cantidad de potencia relativamente pequeña, los anillos rozantes operan satisfactoriamente. Por otra parte, cuando se manejan potencias elevadas, resulta cada vez más difícil el aislar suficientemente sus anillos rozantes y por lo tanto, éstos se convierten en un motivo frecuente de problemas. Debido a esto, la mayor parte de los generadores de c-a tienen una *armadura estacionaria* y un *campo rotatorio*. En estos generadores, las bobinas de armadura están montadas permanentemente con arreglo a la circunferencia interna de la cubierta del generador, en tanto que las bobinas de campo y sus piezas polares están montadas sobre un eje y giran dentro de la armadura estacionaria. Esta disposición de armadura estacionaria y campo rotatorio parece extraña a primera vista; pero si se tienen presentes los fundamentos de la inducción mutua, se comprenderá que en las bobinas de armadura se induce un voltaje independientemente de que corten las líneas de flujo de un campo magnético estacionario o bien que las corten las líneas de flujo de un campo magnético móvil. Lo que se requiere es que haya un *movimiento relativo* entre el campo magnético y las bobinas de armadura.

En el campo de una armadura estacionaria, la salida del generador puede *conectarse directamente* a un circuito externo sin necesidad de anillos rozantes ni escobillas, lo cual elimina los problemas de aislamiento que existirían si fuese necesario producir corrientes y voltajes elevados a la carga, por medio de anillos rozantes. Naturalmente, como el devanado de campo gira, deben usarse anillos rozantes para conectar el devanado a su fuente externa de excitación de c-c. Sin embargo, los voltajes y corrientes que se manejan son pequeños, comparados con los de armadura y no hay dificultad en suministrar el aislamiento suficiente.

La mayor parte de los generadores de c-a tienen una armadura estacionaria y un campo magnético, en lugar de una armadura rotatoria y un campo estacionario

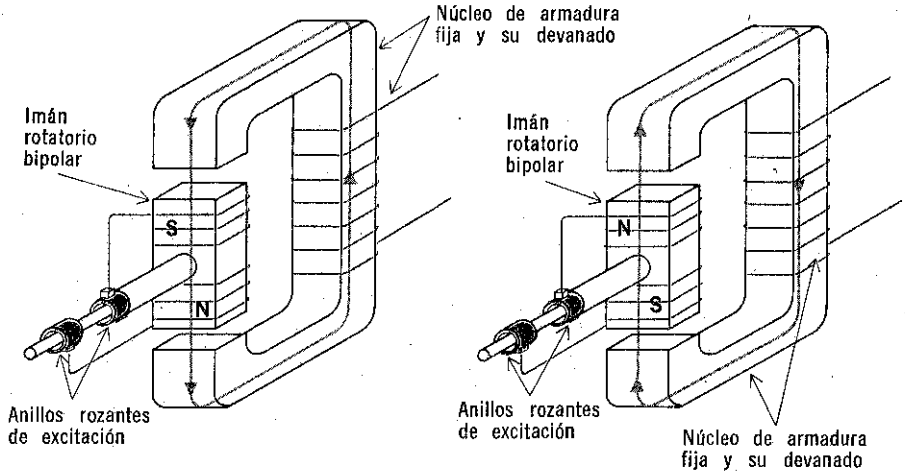
La armadura está representada por una sola espira, pero en los generadores de c-a reales, la armadura consta de muchas bobinas, cada una de las cuales tiene generalmente más de una espira



Este diagrama sólo es una analogía. En realidad, el devanado de campo rotatorio debe estar en el rotor, dentro de la armadura estacionaria, de manera que los dos tipos de alternadores de hecho se asemejan; en la siguiente página se muestra una armadura estacionaria típica.

generadores de c-a con armadura estacionaria (cont.)

Otra ventaja en usar una armadura estacionaria es que hace posible velocidades de rotación mucho más altas y por lo tanto, *voltajes más altos* de los que se pueden obtener con armaduras rotatorias; esto se debe nuevamente a la dificultad que hay en aislarla. A velocidades de rotación muy elevadas, la elevada fuerza centrífuga que resulta hace difícil aislar adecuadamente el devanado de armadura. Este problema no existe cuando el devanado de campo gira a altas velocidades.



Al girar los polos de campo en un generador de armadura estacionaria, las líneas de flujo que van de los polos N a los polos S pasan a través del núcleo de armadura primeramente en una dirección y luego en la otra, para inducir c-a en el devanado de armadura estacionaria

En resumen, en tanto que prácticamente todos los generadores de c-c constan de una armadura rotatoria y un campo estacionario, la mayor parte de los generadores de c-a tienen una armadura estacionaria y un campo rotatorio. En el caso de una armadura estacionaria, se pueden producir voltajes mucho mayores que los que son posibles con generadores de armadura rotatoria. La parte de un generador que gira se llama rotor en tanto que la parte estacionaria recibe el nombre de *estator*.

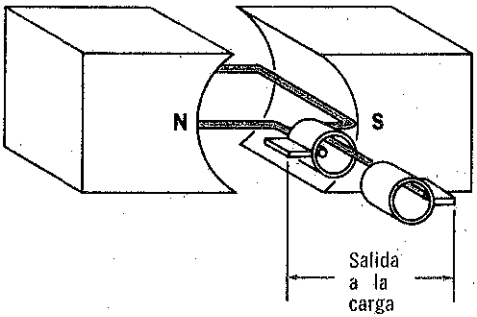
Nótese que si un generador de c-a de armadura estacionaria está provista de un imán *fijo* para el campo en el rotor, en lugar de un electroimán, no se necesitarán anillos rozantes. Sin embargo, este generador tiene una salida muy baja, por lo que sus aplicaciones son limitadas.

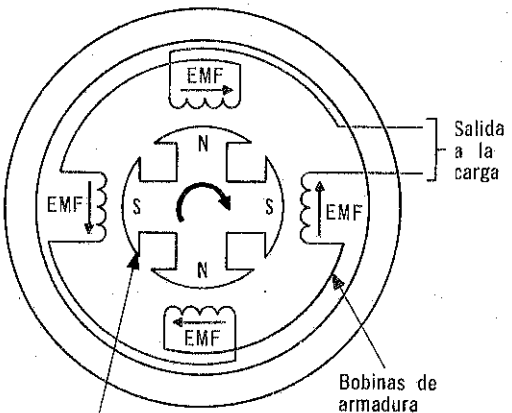
generadores de c-a monofásicos

Cuando se trató de generadores de c-a, la armadura ha sido representada por una sola espira. El voltaje inducido en esta espira sería muy pequeño; así pues, lo mismo que ocurre en los generadores de c-c, la armadura consta en realidad de numerosas bobinas, cada una con más de una espira. Las bobinas están devanadas de manera que cada uno de los voltajes en las espiras de cualquier bobina se *suman* para producir el voltaje total de la bobina. Las bobinas se pueden conectar de varias maneras, según el método específico que se use para darle las características deseadas al generador.

Si todas las bobinas de armadura se conectan en serie aditiva, el generador tiene una *salida única.* La salida es sinusoidal y en cualquier instante es igual en amplitud a la suma de voltajes inducidos en cada una de las bobinas. Un generador con armadura devanada en esta forma es un *generador de una fase o monofásico.* Todas las bobinas conectadas en serie constituyen el devanado de armadura. En la práctica, muy pocos generadores de c-a son monofásicos, ya que puede obtenerse una mayor eficiencia conectando las bobinas de armadura mediante otro sistema.

Una espira simple girando en un campo magnético es un generador monofásico, ya que sólo tiene un voltaje de salida



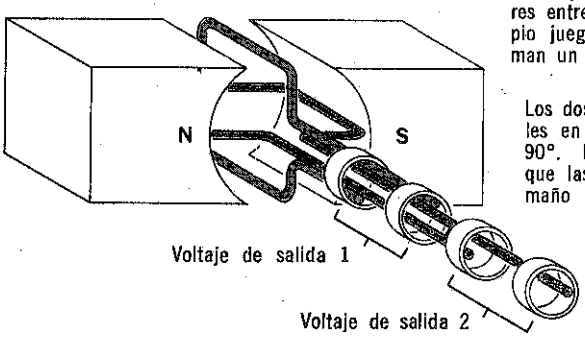


Este generador con armadura estacionaria de 4 polos también es de una sola fase, ya que tiene una salida de voltaje

Con las bobinas de armadura devanadas en la forma mostrada, los voltajes inducidos en las bobinas se suman para producir el voltaje de salida

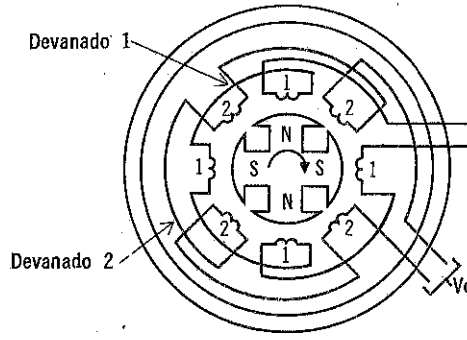
generadores de c-a bifásicos

Generador de espira rotatoria de dos fases



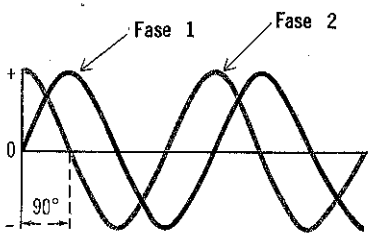
Dos espiras rotatorias perpendiculares entre sí, cada una con su propio juego de anillos rozantes, forman un generador de dos fases

Los dos voltajes de salida son iguales en amplitud y están defasados 90°. Esto, naturalmente, supone que las espiras son del mismo tamaño



Generador bifásico con armadura estacionaria

Al girar el campo, induce el voltaje máximo primero en un devanado y luego en el otro. Las bobinas de los devanados están espaciadas de manera que existe una diferencia de 90° entre los voltajes inducidos en los dos devanados



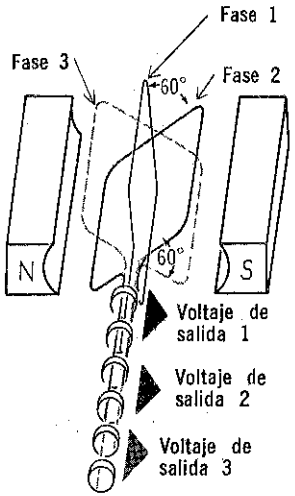
En un generador bifásico, las bobinas de armadura están devanadas de manera que el generador tenga dos voltajes de salida separados que difieren en fase, por 90 grados. Un generador simple bifásico de espira rotatoria consta de dos espiras perpendiculares entre sí; cada espira está conectada a su propio juego de anillos rozantes. Cuando el voltaje inducido en una espira es máximo, el voltaje en la otra es cero y viceversa. Por lo tanto, los voltajes obtenidos en los anillos rozantes difieren 90 grados en fase.

Las bobinas de armadura de un generador bifásico real con una armadura estacionaria se dividen en dos devanados monofásicos, espaciando cada bobina de los dos devanados de manera que los voltajes inducidos en ambos estén defasados 90 grados.

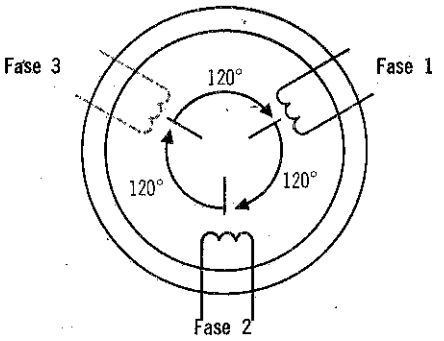
generadores de c-a trifásicos

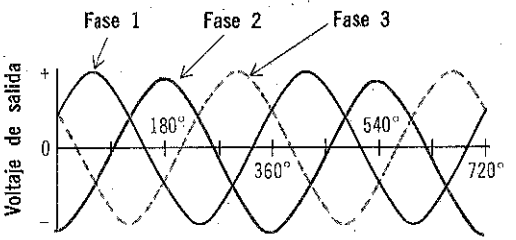
Básicamente, los principios del generador trifásico son los mismos que los de un generador bifásico, excepto que se tienen tres devanados *espaciados igualmente* y tres voltajes de salida *defasados* 120 grados entre sí. A continuación, se ilustra un generador simple trifásico de espira rotatoria, incluyendo las formas de onda. Físicamente, las espiras adyacentes están separadas por un ángulo equivalente a 60 grados de rotación. Sin embargo, los extremos de la espira están conectados a los anillos rozantes de manera que la tensión 1 está adelantada 120 grados con respecto a la tensión 2; y la tensión 2, a su vez, está adelantada 120 grados con respecto a la tensión 3.

Generador trifásico de espira rotatoria



Generador trifásico de armadura estacionaria



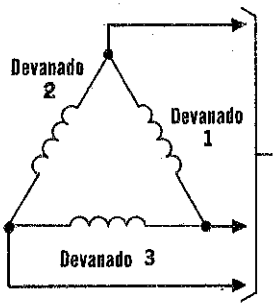


Un generador trifásico produce tres voltajes iguales defasados 120°

También se muestra un diagrama simplificado de un generador trifásico de armadura estacionaria. En este diagrama, las bobinas de cada devanado se combinan y están representadas por una sola. Además, no aparece el campo rotatorio. La ilustración muestra que el generador trifásico tiene tres devanados de armadura separados, defasados 120 grados.

Conexión Delta

En la conexión delta, el extremo del devanado 1 se conecta al punto inicial del devenado 2, el extremo del devanado 2 al inicial del 3 y el extremo del 3 al inicial del 1



Los tres devanados forman así un circuito cerrado. Las puntas se extraen de las tres juntas de los devanados para conectarse a la carga. Dos cualesquiera de los tres conductores toman el voltaje de fase en una bobina

conexiones delta e Y

Como se estudió en la página anterior, hay seis puntas que salen de los devanados de armadura de un generador trifásico y el voltaje de salida está conectado a la carga externa por medio de estas seis puntas. En la práctica, esto no sucede así. En lugar de ello, se conectan los devanados entre sí y sólo salen *tres* puntas que se conectan a la carga.

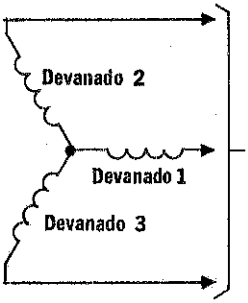
Existen dos maneras en que pueden conectarse los devanados de armadura. El que se emplee uno u otro es cosa que determina las características de la salida del generador. En una de las conexiones, los tres devanados están conectados *en serie* y forman un circuito cerrado. La carga está conectada a los tres puntos donde se unen dos devanados. A esto se le llama *conexión delta*, ya que su representación esquemática es parecida a la letra griega delta (Δ). En la otra conexión, una de las puntas de cada uno de los devanados se junta con una de los otros dos, lo que deja tres puntas libres que salen para la conexión a la carga. A éste se le llama conexión Y*, ya que esquemáticamente representa la letra Y.

Nótese que, en ambos casos, los devanados están espaciados 120 grados, de manera que cada devanado producirá un voltaje defasado 120 grados con respecto a los voltajes de los demás devanados.

* Nota: También se llama conexión estrella.

Conexión Y (estrella)

En la conexión Y, los extremos iniciales de cada devanado se conectan juntos y los finales se conectan a la carga

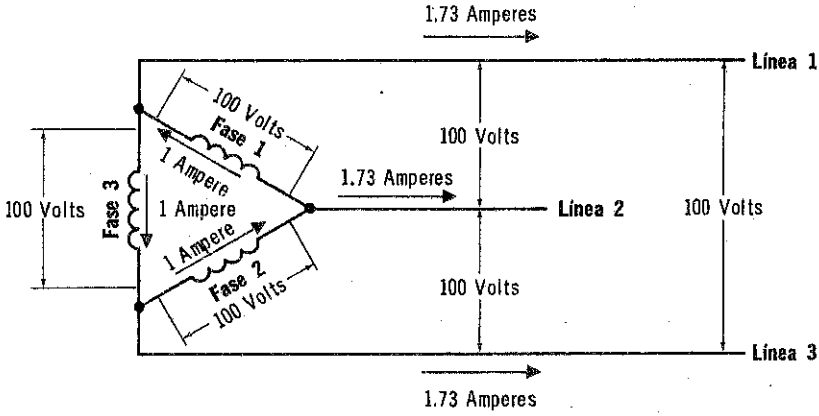


Dos cualesquiera de los tres conductores toman la suma vectorial de los voltajes de fase de dos bobinas en serie

características eléctricas de las conexiones delta e Y

Como todos los devanados de una conexión delta están conectados en serie y forman un circuito cerrado, podría parecer que hay una elevada corriente continuamente en los devanados, aun en ausencia de carga conectada. En realidad, debido a la diferencia de fase que hay entre los tres voltajes generados, pasa una corriente despreciable o nula en los devanados en condiciones de vacío (sin carga).

Las tres puntas que salen de la conexión delta se usan para conectar la salida del generador a la carga. El voltaje existente entre dos cualesquiera de las puntas, llamada *voltaje de la línea*, es igual al voltaje generado en un devanado, que recibe el nombre de *voltaje de fase*. Así pues, como se puede apreciar en la figura, tanto los tres voltajes de fase como los tres voltajes de línea son iguales, y todos tienen el mismo valor. Sin embargo, la corriente en cualquier línea es $\sqrt{3}$ o sea, aproximadamente 1.73 veces la corriente en cualquier fase del devanado. Por lo tanto, nótese que una conexión delta suministra un *aumento de corriente* pero *no hay aumento en el voltaje.*



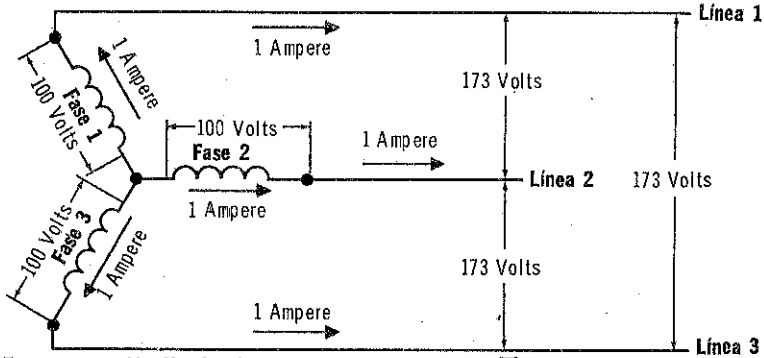
En una conexión delta, el voltaje de línea es igual al voltaje de fase, en tanto que la corriente de línea es igual a $\sqrt{3}$ ó 1.73 veces la corriente de fase

La *potencia total real* que produce un generador trifásico conectado en delta es igual a $\sqrt{3}$, o 1.73 veces la potencia real en cualquiera de las líneas. Sin embargo, téngase presente de lo estudiado en los volúmenes 3 y 4, que la potencia real depende del factor de potencia (cos θ) del circuito. Por lo tanto, la potencia real total es igual a 1.73 veces el voltaje de la línea multiplicado por la corriente de línea, multiplicada a su vez, por el factor de potencia. O sea:

$$P_{REAL} = 1.73\, E_{LINEA} I_{LINEA} \cos \theta$$

características eléctricas de las conexiones delta e Y (cont.)

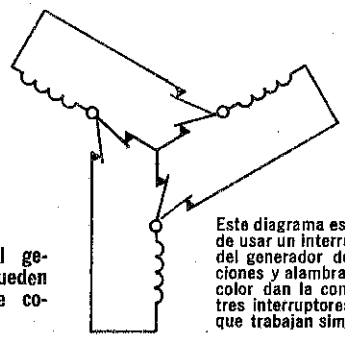
Las características de voltaje y corriente de una conexión Y son *opuestas* a las que presenta una conexión delta. El voltaje que hay entre dos líneas cualesquiera de una conexión Y es 1.73 veces el voltaje de una fase, en tanto que las corrientes en la línea son iguales a las corrientes en el devanado de cualquier fase. Esto presenta un contraste con la conexión delta en la cual, según se recordará, el voltaje en la línea es igual al voltaje de fase y la corriente en la línea es igual a 1.73 veces la corriente en la fase. Así pues, en tanto que una conexión delta hace posible aumentar la corriente sin aumentar el voltaje, la conexión Y aumenta el voltaje pero no la corriente.



En una conexión Y, el voltaje de línea es igual a $\sqrt{3}$ ó 1.73 veces el voltaje de fase, en tanto que la corriente de línea es igual al voltaje de fase

La *potencia total real* que produce un generador conectado en Y es igual a la de un generador conectado en delta. Por lo tanto, la potencia real total es igual a:

$$P_{REAL} = 1.73\, E_{LINEA} I_{LINEA} \cos \theta$$



Cambiando los devanados del generador de Y a delta, se pueden cambiar las características de corriente y voltaje

Este diagrama esquemático muestra cómo se puede usar un interruptor para cambiar los devanados del generador de conexión Y a delta. Las posiciones y alambrado del interruptor mostrados en color dan la conexión delta. En la práctica, los tres interruptores están combinados de manera que trabajan simultáneamente

resumen

☐ Los generadores de c-a también se llaman alternadores. ☐ Como la conversión de c-a a c-c no es necesaria en un generador de c-a, tampoco es necesario un conmutador. ☐ El generador de c-a está provisto de anillos metálicos, llamados anillos rozantes, que sirven para conectar las bobinas rotatorias a las escobillas. ☐ La frecuencia de salida de un generador de c-a es igual a la frecuencia de rotación multiplicada por el número de pares de polos. ☐ Los generadores de c-a no pueden ser autoexcitados, sino que deben usarse fuentes separadas de voltaje de c-c para dar corriente de excitación.

☐ La mayor parte de los generadores de c-a tienen una armadura estacionaria y un campo rotatorio. La salida del generador se conecta entonces directamente al circuito externo. ☐ En un generador de armadura estacionaria, se usan anillos rozantes y escobillas para conectar el devanado del campo rotatorio a su fuente excitadora externa de c-c. ☐ Los generadores de armadura estacionaria pueden girar a velocidades muy altas y, por lo tanto, generar voltajes muy grandes. ☐ La parte giratoria de un generador de c-a se llama rotor. ☐ La porción estacionaria recibe el nombre de estator.

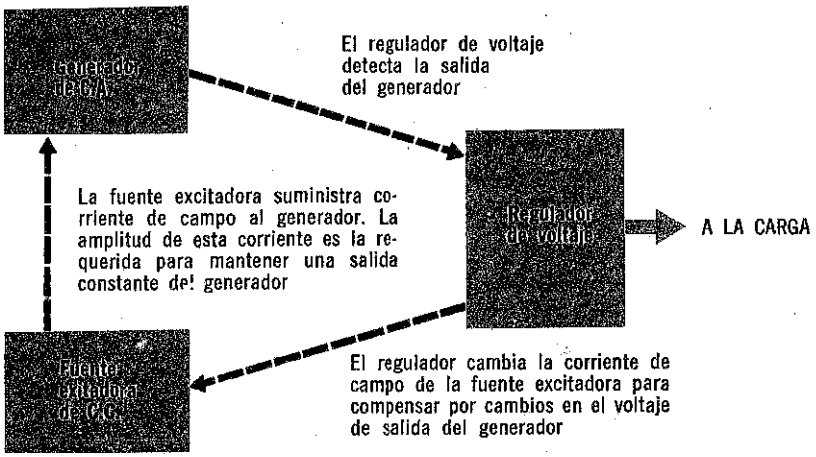
☐ Un generador de c-a de dos fases produce dos voltajes defasados por 90 grados. ☐ Un generador de c-a de tres fases produce tres voltajes que difieren 120 grados en fase. ☐ En el caso de generadores trifásicos, sólo salen tres puntas al exterior, para conectar a la carga. Se puede hacer ya sea una conexión delta o una conexión Y. ☐ La conexión delta hace posible aumentar la corriente pero no aumentar el voltaje. ☐ Una conexión Y hace posible que el voltaje aumente pero no la corriente. ☐ El voltaje existente entre dos terminales cualesquiera de un generador trifásico se llama voltaje de línea.

preguntas de repaso

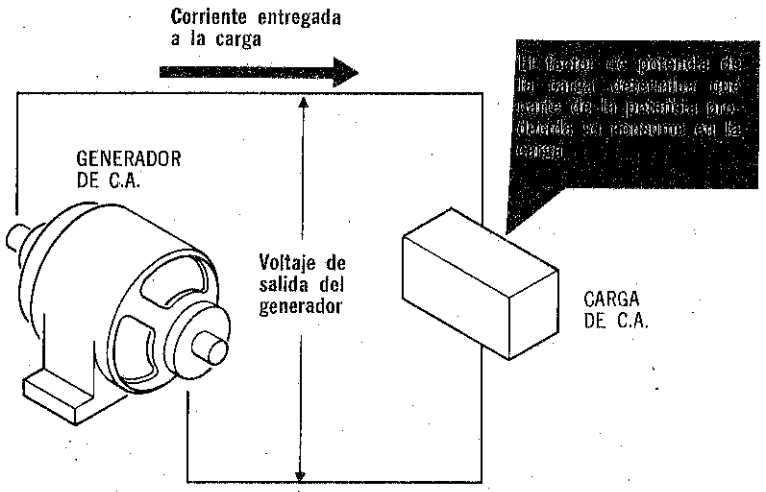
1. ¿Puede ser autoexcitado un generador de c-a? ¿Por qué?
2. En un generador de c-a, ¿cuál es la ventaja de tener una armadura estacionaria y un campo rotatorio?
3. ¿Se necesitan anillos rozantes en un generador de armadura estacionaria?
4. En un alternador, ¿cuál es el rotor? ¿Cuál es el estator?
5. ¿Qué es un generador trifásico de c-a?
6. Trace el diagrama de una conexión delta. Trace el de una conexión Y.
7. ¿Cuál es el voltaje de línea en las conexiones delta e Y?
8. Si un generador trifásico debe suministrar voltaje máximo a una carga, ¿se usaría una conexión delta o una Y?
9. ¿Qué ventajas tienen los generadores de c-a sobre los generadores de c-c?
10. ¿Por qué son innecesarios los conmutadores en generadores de c-a?

regulación del generador

Cuando cambia la carga en un generador de c-a, el voltaje de salida también tiende a cambiar, como ocurre en un generador de c-c. La principal razón de ello es el cambio de la caída de voltaje en el devanado de armadura, ocasionado por el cambio en la corriente de carga. Sin embargo, en tanto que en un generador de c-c la caída de voltaje en el devanado de armadura es simplemente una caída IR, en un generador de c-a existe una caída IR y una *caída* IX_L producida por la corriente alterna que fluye a través de la inductancia del devanado. La caída IR depende sólo de la cantidad del cambio de carga; pero la caída IX_L depende también del *factor de potencia* del circuito. Así pues, el voltaje de salida de generadores de c-a varía con los cambios en la corriente de carga lo mismo que con todo cambio en el factor de potencia. Como resultado, un generador de c-a que tiene una regulación satisfactoria para un valor de factor de potencia puede tener una mala regulación con otro valor del factor de potencia.



Debido a su regulación inherentemente mala los generadores de c-a generalmente están provistos de algún medio auxiliar de regulación. Los reguladores auxiliares usados, independientemente de que sean operados manualmente o de que funcionen de manera automática cumplen su función básicamente de la misma manera; "sienten" el voltaje de salida del generador y, cuando éste cambia, ocasionan un cambio correspondiente en la corriente de cambio de la fuente excitadora que suministra la corriente de campo al generador. Así pues, si el voltaje de salida del generador se reduce, el regulador produce un aumento en la corriente de campo de la fuente excitadora. Por tanto, el voltaje de salida de la fuente excitadora, aumenta, haciendo que también aumente la corriente en el devanado de campo del generador. Como resultado, el campo magnético del generador aumenta en intensidad y eleva el voltaje del generador a su amplitud original. Una secuencia de eventos similar pero opuesta ocurre cuando el regulador siente una disminución en el voltaje de salida del generador.



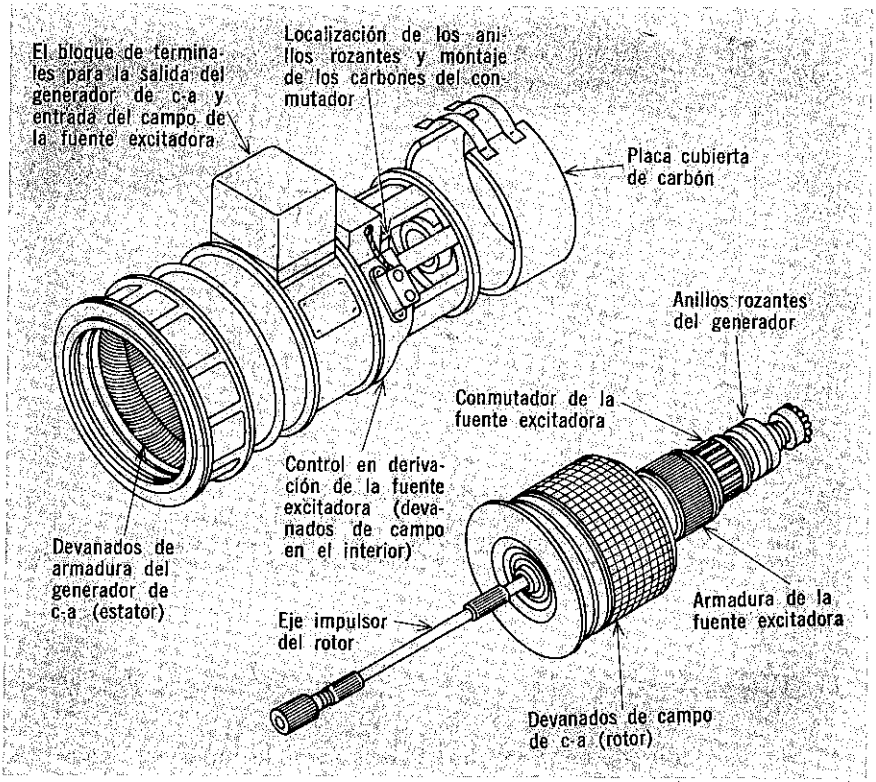
Los generadores de c-a se clasifican según la potencia aparente máxima que puedan producir independientemente de cómo es consumida esta potencia por la carga, lo cual se determina por el factor de potencia de la carga.

clasificación de los generadores de c-a

Todo generador de c-c tiene una clasificación de potencia, expresada normalmente en kilowatts, que indica la máxima potencia que puede ser constantemente alimentada por el generador. Por otra parte, los generadores de c-a no pueden generalmente clasificarse de la misma manera, ya que la potencia *consumida* en un circuito de c-a depende del *factor de potencia* del circuito, lo cual significa que un generador de c-a puede alimentar una cantidad moderada de potencia real para una carga y, sin embargo, si el factor de potencia de la carga fuese bajo, la potencia total o aparente que el generador produce realmente puede ser muy grande. En estas condiciones, el generador se puede quemar.

Por esta razón, los generadores de c-a no deben clasificarse según la máxima potencia de consumo permisible de la carga, sino de acuerdo con la *potencia aparente* máxima que pueden pasar. Esto se hace expresando la capacidad en *voltamperes* o *kilovoltamperes*. Así pues, para determinado voltaje de salida se sabe la máxima corriente que el generador puede producir, independientemente del factor de potencia de la carga. Por ejemplo, si un generador clasificado como de 100 kilovoltamperes tiene una salida de 50 kilovolts, o sea que la máxima corriente que puede producir sin peligro es de 100 kilovoltamperes dividido entre 50 kilovolts, es decir, 2 amperes.

Ocasionalmente, los generadores de c-a se diseñan para usarse con cargas que tengan un factor de potencia constante. En este caso, la clasificación de estos generadores puede indicarse en watts o kilowatts, *para ese factor de potencia particular.*



estructura de los generadores de c-a

Desde el punto de vista de apariencia física, los generadores de c-a varían considerablemente, desde los muy grandes, impulsados por turbinas que pesan miles de kilogramos, hasta pequeños generadores de aplicación especial que sólo pesan unos cuantos kilogramos y aun menos. Sin embargo, según ha quedado apuntado, prácticamente todos los generadores de c-a tienen armaduras estacionarias y campos rotatorios. Los devanados de armadura se colocan siguiendo la circunferencia interna de la cubierta del generador y generalmente se incrustan en un núcleo de hierro laminado. El núcleo y los devanados constituyen el estator.

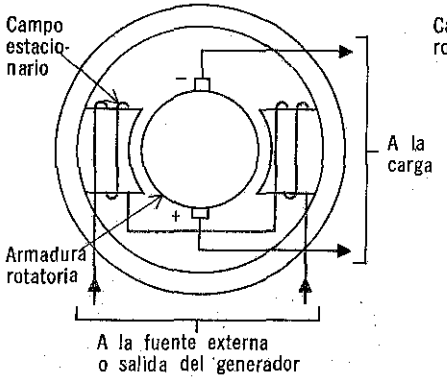
Los devanados de campo y los polos de campo, que constituyen el rotor, están montados sobre un eje y giran con el estator. También sobre el eje del rotor se encuentran montados los anillos rozantes para los devanados de campo. Cuando el generador contiene su propia fuente excitadora de c-c, la armadura de la fuente excitadora y el conmutador también están montados en el eje del motor. Los portaescobillas para los anillos rozantes del generador y el conmutador de la fuente excitadora están montados en la cubierta del generador, lo mismo que las terminales para efectuar las conexiones eléctricas al generador. La figura representa un generador de c-a típico con fuente excitadora dentro de él.

comparación de generadores de c-c y de c-a

Ahora que se han estudiado tanto los generadores de c-c como los de c-a, se pueden observar las *semejanzas* básicas que hay entre ellos, así como sus *diferencias* fundamentales. En un generador de c-a, el voltaje inducido se transmite directamente a la carga, a través de anillos rozantes en tanto que en un generador de c-c el conmutador convierte la c-a inducida en c-c antes de que ésta sea aplicada a la carga.

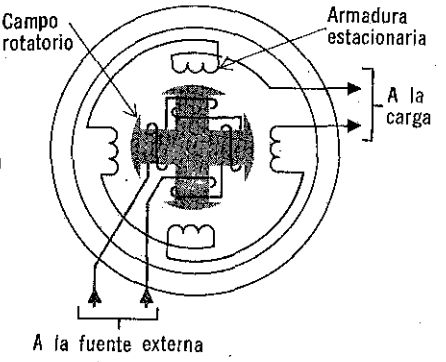
Una diferencia física importante entre los generadores de c-c y los de c-a estriba en que el campo de la mayor parte de los generadores de c-c es estacionario y la armadura gira, en tanto que lo opuesto ocurre generalmente en los generadores de c-a. Esto tiene el efecto de hacer que los generadores de c-a puedan tener salidas mucho mayores de las que son posibles con generadores de c-c. Otra diferencia entre ambos tipos de generadores es la fuente de voltaje de excitación para el devanado de campo. Los generadores de c-c pueden constar ya sea de una fuente de excitación externa y separada o bien obtener el voltaje necesario directamente de su propia salida. Por su parte, los generadores de c-a deben estar provistos de una fuente separada.

Generador de c-c



El generador de c-c tiene una armadura rotatoria y un campo estacionario. El voltaje para su campo se puede obtener ya sea de una fuente externa o de la propia salida del generador

Generador de c-a



El generador de c-a tiene una armadura estacionaria y un campo rotatorio. El voltaje para ese campo debe provenir de una fuente externa, llamada fuente excitadora

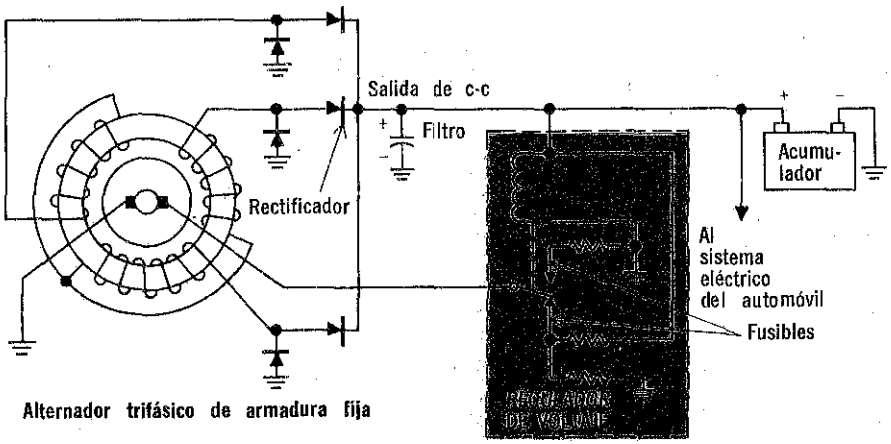
Por lo que respecta a la regulación de voltaje los generadores de c-c son inherentemente más estables que los de c-a. Una de las razones es que, aunque los voltajes de salida de ambos tipos de generador son sensibles a los cambios de carga, el voltaje de salida de un generador de c-a también es sensible a cambios en el factor de potencia de la carga. Además, es posible un buen grado de autorregulación en un generador de c-c usando un devanado de armadura combinado, lo cual no es factible en generadores de c-a, ya que éstos deben ser excitados separadamente.

el alternador de automóvil

La comparación de las ventajas de los generadores de c-c y de los alternadores, los cuales se acaban de estudiar, se basa en las categorías aceptadas de los generadores básicos. Sin embargo, es posible combinar las ventajas de generadores c-c y c-a mediante diseños de circuitos adicionales. Para el alternador de automóvil, esto se logra en una forma única para producir una fuente de carga de c-c de corriente elevada con un generador del tipo de c-a. A éste se le llama alternador aunque produce un voltaje de c-c ya que en realidad, se trata de un generador de c-a. de armadura fija con *rectificadores,* para convertir la c-a en c-c.

Los rectificadores son dispositivos que, en su mayor parte, conducen sólo en una dirección. Así pues, el rectificador pasará solamente una polaridad del voltaje de c-a para producir una c-c pulsante. El alternador común de automóvil produce c-a trifásica, de manera que después de que el voltaje se convierte en c-c, se tiene menos ondulación. Luego se conecta un capacitor a la salida, para filtrar la ondulación y obtener un voltaje de c-c relativamente con poca variación.

Debido a que los rectificadores se oponen al flujo de corriente en la dirección opuesta, no se necesita relevador de corte de corriente inversa en el regulador de voltaje. Además, como el alternador es un generador de alta corriente, tampoco se necesita un regulador de corriente. Por lo tanto, el regulador para el alternador es mucho más simple que para el generador de c-c; sólo cuenta con un circuito de relevador para regular el voltaje de salida del alternador, controlando la corriente del campo. Nótese que, a pesar de ser un alternador, *es autoexcitado.* Esto se puede hacer debido a que la salida rectificada es c-c.



Alternador trifásico de armadura fija

En un sistema de alternador para automóvil, la armadura del relevador del regulador de voltaje vibra para conectar y desconectar el devanado del rotor de campo y de la salida del c-c controlando así el voltaje de salida en forma semejante a un regulador del generador de c-c

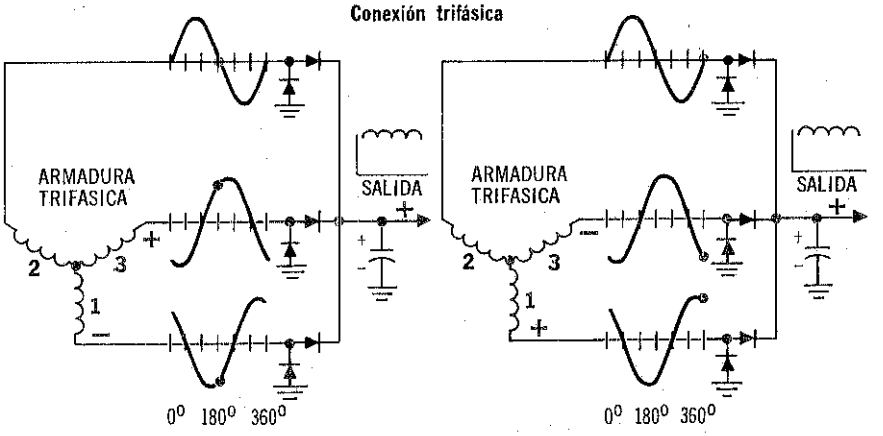
Sin embargo, no se necesita relevador de corte de corriente inversa debido a que los rectificadores evitan la corriente inversa; y un regulador de corriente no se necesita, ya que el alternador puede funcionar con grandes corrientes. Sin embargo, se usan alambres fusibles en el regulador para abrir el circuito en el caso de corrientes muy altas

funcionamiento del alternador

El alternador de automóvil trifásico está provisto de devanados de armadura fija conectados en Y, los cuales, según se ha explicado, producen un voltaje de fase entre dos puntas de salida. La salida del alternador es un voltaje positivo en relación con tierra. Pero *ninguna* punta de los devanados Y está conectada directamente a tierra debido a que los devanados producen c-a; las tres puntas son alternativamente negativas y positivas, al recorrer los ciclos de c-a. Por lo tanto, cada punta debe conectarse a tierra cuando es negativa y, a la salida, cuando es positiva. Esto se logra con rectificadores.

Los rectificadores sirven como interruptores que cierran una polaridad y abren la otra. Nótese que cada onda tiene dos rectificadores conectados en oposición. Un rectificador conectará la punta a la línea de salida cuando sea positiva, pero la desconectará cuando sea negativa. El otro rectificador conecta la terminal a tierra cuando es negativa y la desconecta cuando es positiva. El diagrama ilustra cómo se conectan los mismos dos devanados para ángulos de fase diferentes del voltaje de salida. En consecuencia, la salida siempre es positiva.

Si se recuerda lo estudiado acerca del generador de c-c, es fácil comprender que el conmutador era necesario para efectuar la misma operación siempre que las puntas cambiaran de polaridad, ya que la armadura siempre produce c-a. Por lo tanto, en el alternador los rectificadores sirven como conmutadores electrónicos, por lo que es discutible si el alternador *es* en realidad un alternador o nada más otro tipo de generador de c-c.

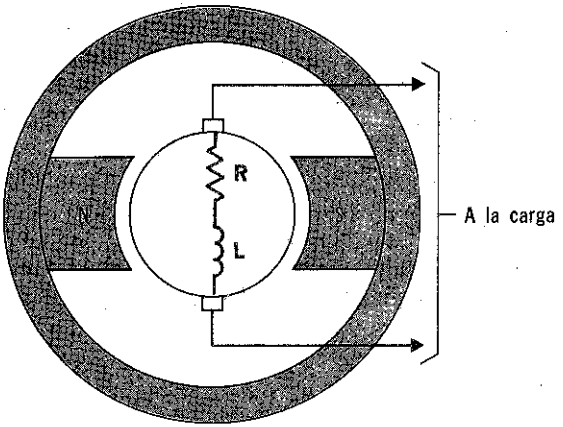


Sólo se muestran aquí dos posibilidades. A 120°, el devanado 2 sería positivo y estaría conectado a la salida en lugar del devanado 3, que estaría ajustado a cero watts. El devanado 1 seguiría siendo negativo.

A 60°, el devanado 3, sería negativo e iría a tierra en tanto que el devanado 2 sería positivo e iría a la salida. En los ángulos de fase intermedios, es posible tener dos devanados conectados a la salida y uno a tierra y viceversa

resistencia interna del generador

En todo generador, la corriente de carga fluye a través del devanado de armadura. Como cualquier bobina o devanado, la armadura tiene *resistencia* e *inductancia*. La combinación de esta resistencia y la reactancia inductiva que ocasiona la inductancia, constituye la llamada *resistenia interna* del generador. Cuando fluye corriente de carga, produce una caída de voltaje en la resistencia interna. Esta caída de voltaje se resta del voltaje de salida del generador y, en consecuencia, representa voltaje generado, el cual se *pierde* y no puede ser aprovechado por la carga.



El devanado de armadura de cada generador tiene resistencia e inductancia. La resistencia causada por la inductancia constituye la resistencia interna del generador

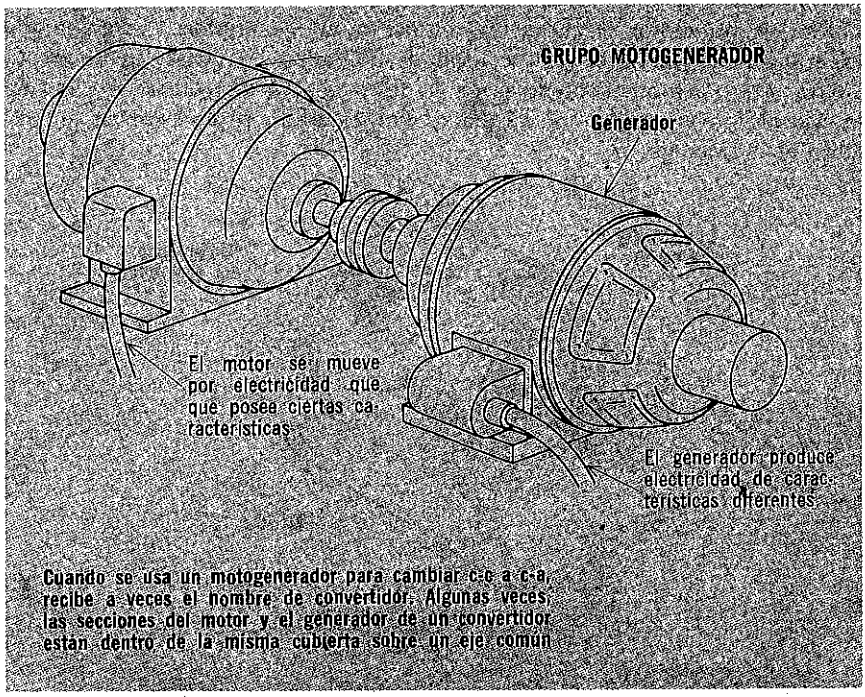
Siempre que hay corriente de carga, se encuentra con la oposición de la resistencia interna. Esta oposición produce una caída de voltaje que se resta del voltaje de salida del generador

Adviértase que, cuanto mayor sea la resistencia interna, mayor será la parte de voltaje generado que se presente como caída interna del generador y, en consecuencia, que se pierde. En un generador de c-c con determinada resistencia interna, la caída de voltaje interno es directamente proporcional a la corriente de carga, siendo igual a:

$$E = I_{CARGA} R_{INTERNA}$$

Así pues, cuanto mayor sea la corriente de carga, mayor será el valor de la caída de voltaje en la resistencia interna. En un generador de c-a, la caída interna de voltaje depende también de la *frecuencia* del voltaje de salida del generador, ya que la reactancia inductiva del devanado de armadura varía siempre que lo hace la frecuencia. Como la velocidad de un generador es uno de los factores que determina la frecuencia, la resistencia interna de un generador de c-a cambiará según la velocidad del generador.

el motogenerador



Cuando se usa un motogenerador para cambiar c-c a c-a, recibe a veces el nombre de convertidor. Algunas veces las secciones del motor y el generador de un convertidor están dentro de la misma cubierta sobre un eje común.

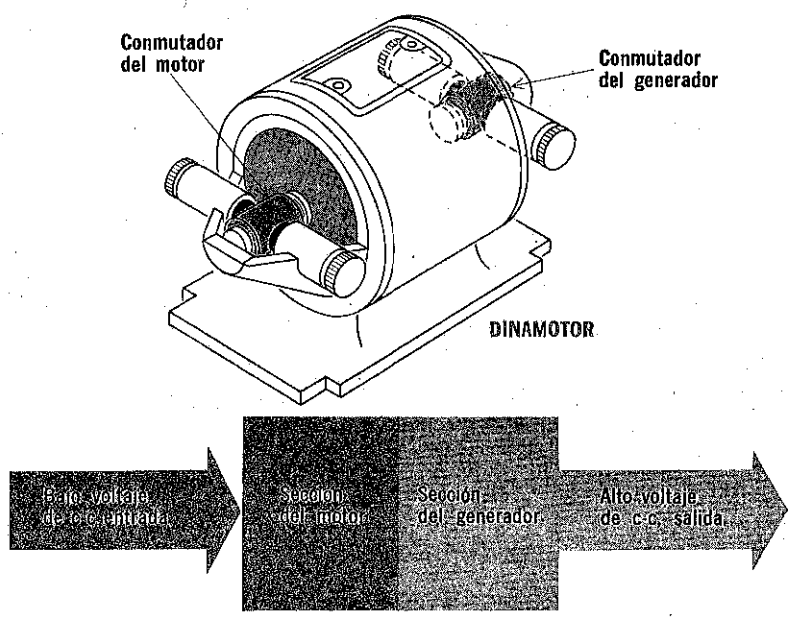
Un motogenerador consta de un motor eléctrico y un generador conectados mecánicamente de manera que el motor hace girar al generador. El *motor* suministra así la *energía mecánica* que el *generador* transforma en *energía eléctrica*. Tanto el motor como el generador de un motor generador suelen estar montados sobre la misma base y pueden moverse e instalarse como una sola unidad.

Los motogeneradores generalmente se usan para *cambiar* electricidad de un voltaje o frecuencia a otro o para convertir c-a en c-c ó c-c en c-a. La electricidad que tiene las características que han de transformarse alimenta al motor y el generador está diseñado para producir electricidad con las nuevas características deseadas. Por ejemplo, el motor puede ser impulsado por una fuente de potencia de 60-cps, en tanto que el generador produce una salida cuya frecuencia es de 400-cps. O bien un motor de c-c puede impulsar a un generador de c-a para lograr la conversión de c-c en c-a.

Cuando el dispositivo cambia una clase de c-a. a otra clase de c-a o a c-c, se llama *grupo motogenerador*. Pero, cuando se usa para convertir c-c en c-a, a veces también se le llama *convertidor*. Muy frecuentemente, el convertidor tiene el motor y el generador dentro de la misma cubierta.

el dinamotor

En ciertos aspectos, el dinamotor es, en realidad un motogenerador. Consta de un motor eléctrico que mueve a un generador. Sin embargo, un grupo motogenerador suele constar de unidades separadas; en un dinamotor, están siempre contenidas en la misma *cubierta común*, en forma similar al convertidor y sus devanados de armadura se encuentran ambos sobre el mismo eje.



Un dinamotor convierte un voltaje de c-c bajo en un voltaje de c-c alto. Tanto la parte del motor como del generador están montadas sobre un eje común dentro de una cubierta común

Los dinamotores sirven para convertir *bajos voltajes de c-c* —generalmente suministrados por baterías— en *altos voltajes de c-c*. El bajo voltaje impulsa al motor que a su vez, hace mover al generador, el cual luego produce un voltaje más alto. Los dinamotores frecuentemente son parte del equipo de comunicaciones para obtener mayores voltajes de c-c que los que pueden obtenerse por medio de baterías. Son muy comunes en aeronáutica, donde muchas clases de equipo electrónico necesitan unos cuantos cientos de volts de c-c para funcionar y la línea principal del avión sólo suministra 28 volts de c-c. Algunos equipos de radioaficionados, que operan mediante baterías de 6 ó 12 volts en automóviles, también ocupan dinamotores para transformar el voltaje al nivel necesario de c-c.

resumen

☐ El voltaje de salida de un generador de c-a varía según los cambios que ocurran en la corriente de carga y según el factor de potencia del circuito. Los reguladores para generadores de c-a controlan la corriente de la fuente excitadora al devanado de campo para compensar los cambios que ocurran en el voltaje de salida. ☐ Los generadores de c-a se clasifican según la máxima potencia aparente que pueden transmitir.

☐ Los generadores de c-a varían considerablemente en apariencia. Sin embargo, prácticamente todos tienen armaduras estacionarias y campos rotatorios. ☐ La resistencia interna de un generador de c-a se compone de resistencia de c-c y reactancia inductiva del devanado de armadura. ☐ El voltaje de salida de un generador se reduce por la caída de voltaje en la resistencia interna. ☐ En un generador de c-c, la caída interna de voltaje es igual a $E = I_{CARGA} R_{INTERNA}$. ☐ En un generador de c-a, la caída interna de voltaje depende también de la frecuencia del voltaje de salida del generador.

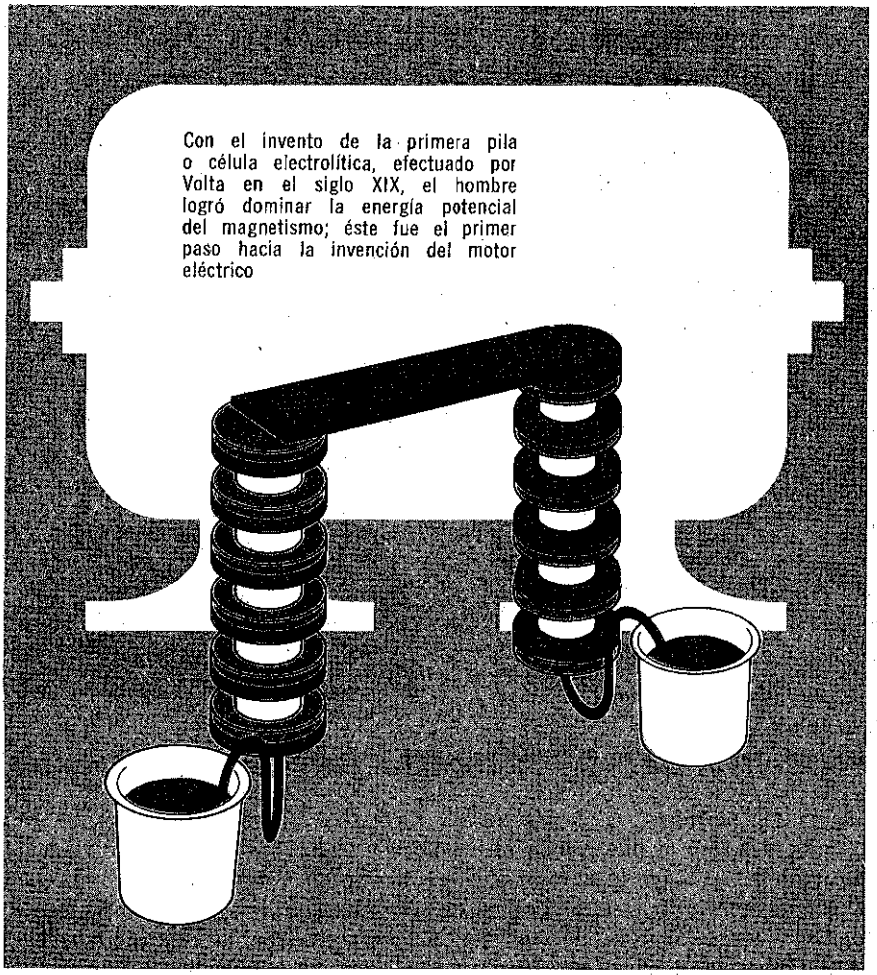
☐ Un motogenerador consta de un motor eléctrico y un generador conectados mecánicamente, de manera que el motor impulsa mecánicamente al generador. Si un motogenerador convierte c-a en otro tipo de c-a, o c-a en c-c, recibe el nombre de grupo motogenerador. ☐ Si convierte c-c en c-a, también se le llama convertidor. ☐ Los dinamotores se usan para convertir bajos voltajes de c-c en voltajes altos de c-c. ☐ Un dinamotor consta de un motor y un generador, contenidos ambos en la misma cubierta y con sus devanados de armadura sobre el mismo eje.

preguntas de repaso

1. ¿Por qué los generadores de c-a no tienen una regulación tan buena como los generadores de c-c?
2. ¿Por qué los generadores de c-a normalmente no se clasifican en watts o kilowatts?
3. Un generador de c-a tiene una clasificación de 20 kilovoltamperes y una salida de 2 kilovolts. ¿Cuál es la máxima corriente que puede producir sin peligro?
4. ¿Qué factores afectan la resistencia interna de un generador de c-a?
5. ¿Para qué sirven los motogeneradores?
6. ¿Qué es un *convertidor*?
7. ¿Para qué sirve un dinamotor?
8. Si el factor de potencia de la carga disminuye en tanto que el voltaje y la corriente de la salida del generador permanece constante, ¿qué sucede con la potencia real que produce un generador de c-a?
9. Si se aumenta la velocidad de un generador de c-a, ¿qué sucede con la resistencia interna?
10. ¿Afecta la velocidad de un generador a la resistencia interna de un generador de c-c?

7

Motores eléctricos — Motores de c-c — Motores prácticos de c-c — Partes del motor de c-c — Motores y generadores — Fuerza contraelectromotriz — Clasificación de los motores de c-c — Potencia nominal de motores — Motor de derivación — Motor de serie — Sentido de rotación — Motores *compound* — Tabla comparativa de motores de c-c — Arrancadores y controles — Arrancadores — Controles — Motores de c-a — Velocidad sincrónica — Motores síncronos — Motores de inducción — Otros motores de c-a.

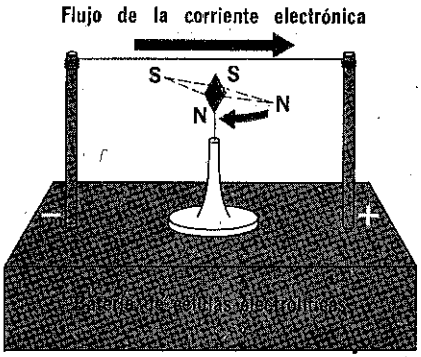


Con el invento de la primera pila o célula electrolítica, efectuado por Volta en el siglo XIX, el hombre logró dominar la energía potencial del magnetismo; éste fue el primer paso hacia la invención del motor eléctrico

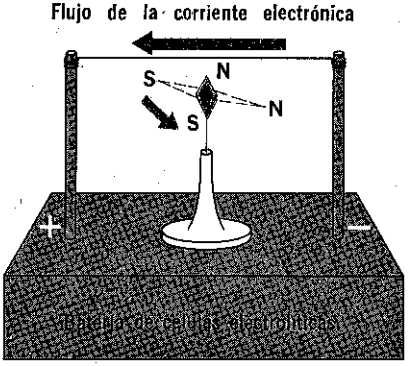
el motor eléctrico

El motor eléctrico es una máquina que puede convertir la electricidad en movimiento rotatorio, con objeto de que efectúe un trabajo útil. Por lo tanto, el motor eléctrico representa uno de los mayores avances logrados para controlar las fuerzas naturales y hacer que desarrollen algún trabajo para el hombre.

En un principio, el hombre substituyó su propia fuerza muscular con la de los animales y, luego, con la potencia que obtuvo de las fuerzas naturales que tenía al alcance, tales como el viento y el agua. Después, cuando Volta inventó la primera pila o célula electrolítica, se logró el control sobre una nueva forma de energía: la eléctrica; con eso se dio el primer paso hacia la invención del motor eléctrico.



Cuando cambia la dirección de la corriente, también cambia la dirección del movimiento de la aguja



Después que Volta demostró cómo se podría controlar la electricidad, Oersted descubrió que una corriente eléctrica podía usarse para mover una aguja magnética, y comprobó así que el flujo de la electricidad producía un campo magnético

movimiento producido por electricidad

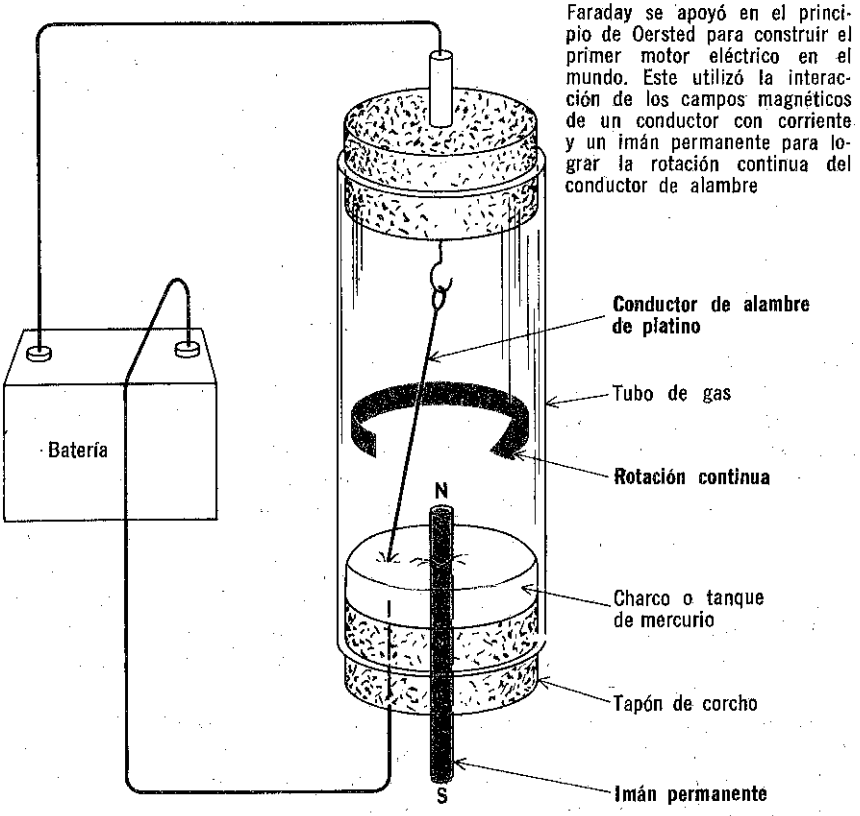
Una vez que la pila quedó al alcance de todos, los hombres de ciencia pudieron hacer experimentos para ver si podían controlar la energía de la corriente eléctrica. Uno de los descubrimientos más importantes efectuados entonces, fue el de los efectos magnéticos de la electricidad. En 1819, Hans Christian Oersted notó que, cuando colocaba una brújula magnética de rotación libre cerca de un conductor con corriente, la aguja se movía hasta quedar en ángulo recto con el alambre y, cuando invertía la dirección de la corriente, la aguja giraba nuevamente, alineándose en la dirección opuesta, siempre en ángulo recto con el conductor. Las conclusiones que se sacan del experimento de Oersted y sus resultados son las siguientes:

1. Un conductor con corriente eléctrica produce un campo magnético; así pues, la electricidad se puede convertir en magnetismo. Gracias a esta información, los hombres de ciencia de la época de Oersted inventaron el *electroimán*.
2. El campo magnético originado por la corriente eléctrica puede interactuar con el campo de un imán para producir *movimiento*. Por lo tanto, la energía eléctrica se puede transformar en energía mecánica. La invención del motor eléctrico fue resultado directo de esta observación.

el motor de faraday

Oersted descubrió que la electricidad se puede utilizar para producir movimiento. Aprovechando este descubrimiento, Faraday construyó en 1821 el primer motor eléctrico del mundo y, diez años más tarde, siguiendo el mismo razonamiento, pero en sentido inverso, descubrió el principio del generador eléctrico.

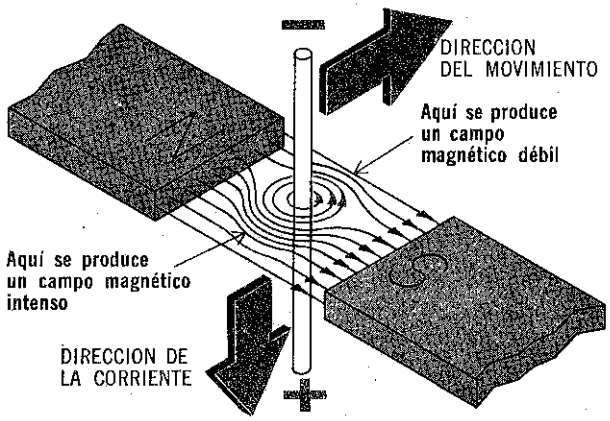
Faraday trataba de hacer que el movimiento producido por el experimento de Oersted fuera continuo, en lugar de un simple desplazamiento giratorio de posición. En sus experimentos, Faraday pensaba en *líneas de fuerza magnética*. Visualizó la existencia de líneas de flujo alrededor de un conductor que lleva corriente y una barra magnética y, así pudo elaborar un aparato donde las diferentes líneas de fuerza podían interactuar para producir una rotación continua. El motor básico de Faraday dispone de un conductor que puede girar libremente alrededor del extremo de un imán recto. El extremo inferior del conductor se encuentra en un depósito de mercurio, lo cual hace posible que el conductor gire y, al mismo tiempo, mantenga un circuito eléctrico cerrado.



Faraday se apoyó en el principio de Oersted para construir el primer motor eléctrico en el mundo. Este utilizó la interacción de los campos magnéticos de un conductor con corriente y un imán permanente para lograr la rotación continua del conductor de alambre

principios del funcionamiento de los motores

Aunque el motor de Faraday era ingenioso, no se podía usar para efectuar trabajo práctico. Esto se debía a que su eje impulsor estaba encerrado y sólo podía producir un movimiento *orbital* interno; no podía transferir su energía mecánica al exterior, para impulsar una carga externa. No obstante, aquel motor sirvió para mostrar cómo se podía hacer que los campos magnéticos de un conductor y un imán interactuaran para producir movimiento continuo. En el motor de Faraday, el rotor de alambre giraba fuera del campo del imán. En un motor práctico, el rotor debe *atravesar* las líneas de fuerza del imán.

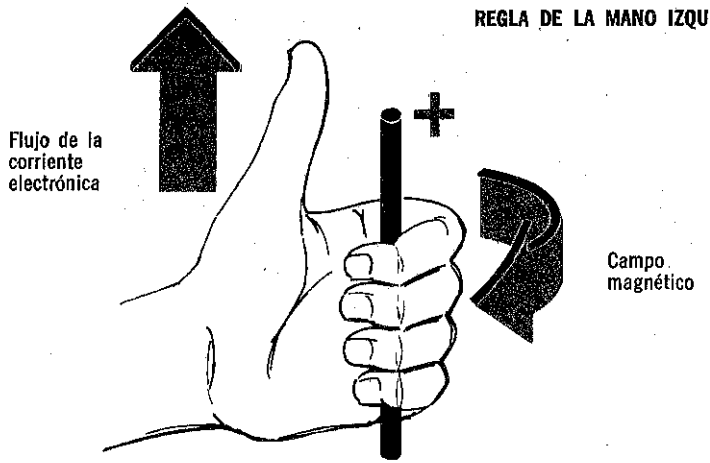


Debido a la dirección de las líneas de flujo que rodean al conductor, las líneas de flujo entre los polos magnéticos tienden a acumularse en el lado en que las líneas de flujo llevan la misma dirección. Esto produce un campo intenso de líneas estrechamente espaciadas y curvas. Las líneas tienden a tomar la trayectoria recta y espaciarse más y al hacerlo, ejercen una fuerza sobre el conductor a ángulo recto con las líneas de flujo en la dirección del campo magnético más débil

Cuando se hace pasar una corriente a través del conductor, se producen líneas de fuerza circulares a su alrededor. La dirección de estas líneas de flujo es descrita por la *regla de la mano izquierda.* Las líneas de fuerza de un imán van del polo N al polo S. Obsérvese que en un lado del alambre, las líneas de fuerza magnéticas tienen la misma dirección que el campo circular que rodea al conductor. En cambio, al otro lado siguen la dirección opuesta; como resultado, las líneas de flujo del conductor se oponen a las líneas de flujo del imán. Como las líneas de flujo siguen la trayectoria de menor resistencia, en el otro lado del conductor se concentra un mayor número de ellas. Debido a esto, las líneas de flujo se desvían y queda muy poco espacio entre ellas. Estas líneas tienden a enderezarse y separarse más ampliamente, por lo cual, la parte del campo donde éstas están más curvas y densas empuja al conductor hacia el otro lado.

La dirección en que se mueve el conductor se determina por la *regla de la mano derecha.* Si la corriente que fluye en el conductor siguiese la dirección opuesta, la dirección de las líneas de flujo se invertiría y el conductor sería impulsado en sentido opuesto.

REGLA DE LA MANO IZQUIERDA

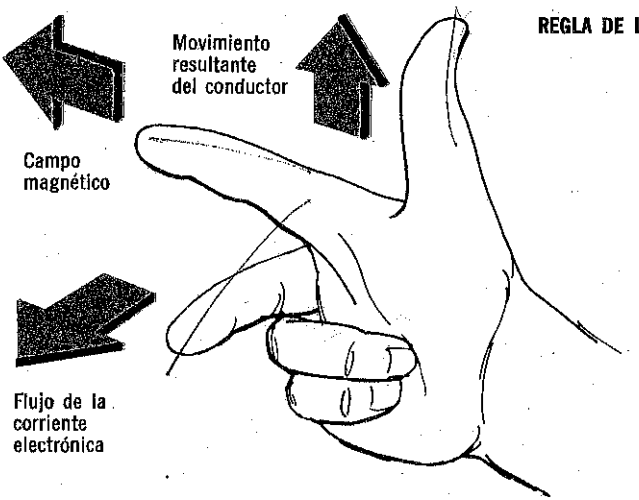


reglas del funcionamiento de los motores

La *regla de la mano izquierda* indica la dirección de las líneas de flujo que hay alrededor de un conductor que lleva corriente. Cuando el pulgar señala en dirección de la corriente eléctrica, los otros dedos señalarán en la misma dirección que las líneas de fuerza magnéticas.

La *regla de la mano derecha* para motores indica la dirección en que un conductor con corriente se moverá en un campo magnético. Cuando el índice señala en dirección de las líneas de campo magnético y el dedo cordial se alinea en la misma dirección que la corriente del conductor, el pulgar señalará la dirección hacia donde se moverá el conductor.

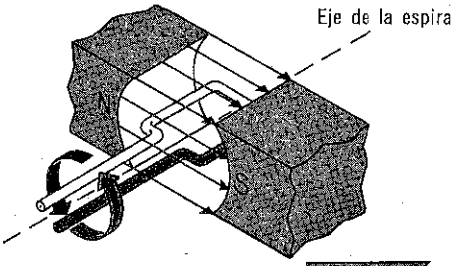
REGLA DE LA MANO DERECHA



par y movimiento rotatorio

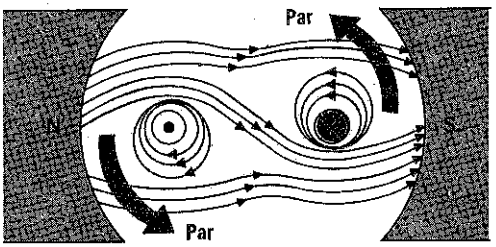
En las secciones anteriores, se estudió un motor elemental en el que el conductor sólo se mueve en línea recta y se detiene en cuanto está fuera del campo, aunque la corriente siga fluyendo en el conductor. Un motor práctico debe producir *movimiento rotatorio continuo.* Para esto, es necesario desarrollar una fuerza de torsión básica llamada *par.*

Si el conductor recto del motor básico se dobla en forma de espira, se podrá ver cómo se produce el par. Si la espira se conecta a una batería, la corriente fluye en una dirección en un lado de la espira y en la dirección opuesta en el otro. Por lo tanto, las líneas de fuerza concéntricas que se producen alrededor de la espira también siguen una dirección en un lado y la opuesta en el otro.



Si, en lugar de tener un conductor de alambre recto, se coloca una espira en un campo magnético y se hace pasar corriente por ella, el campo magnético así creado interactúa con el campo existente para producir un par

El par es una fuerza de torsión que se ejerce sobre la espira y que la hace girar sobre su eje. La dirección de la corriente que se aleja del lector se muestra por un signo así: ⊗ y la que va hacia el lector por otro así: ⊙

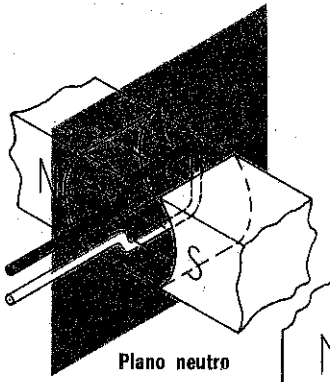


Si la espira se monta en un campo magnético fijo y se alimenta corriente, las líneas de flujo del campo interactuarán en ambos lados de la espira, haciendo que la espira funcione como una palanca con una fuerza que empuja sobre sus dos lados en direcciones opuestas. Las fuerzas combinadas constituyen una fuerza de torsión o *par*, debido a que la espira está dispuesta para girar sobre su eje. En un motor, la espira que se mueve en el *campo* se llama *armadura* o *rotor.* La fuerza giratoria total en la armadura depende de varios factores, incluyendo intensidad del *campo,* intensidad de la corriente de *armadura* y la estructura física de la armadura, especialmente la distancia que hay entre los lados de la espira y las líneas del eje. Debido a este efecto de palanca, las fuerzas ejercidas sobre los lados de la espira de la armadura aumentan cuando los lados de la espira se alejan del eje; de ahí que las armaduras más grandes produzcan pares mayores.

En motores prácticos, el par determina la cantidad de energía que puede aprovecharse para producir trabajo útil. Cuanto mayor sea el par, mayor será dicha energía. Si el motor no produce el par suficiente para impulsar su carga, entonces se *atasca.*

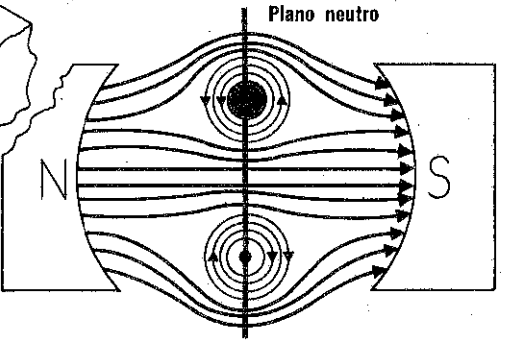
cómo se produce una rotación continua

Ya se explicó que la armadura gira cuando se produce un par y que éste se produce mientras interactúan los campos del imán y la armadura. Cuando la espira está perpendicular al campo, la interacción entre los campos cesa. Esta posición se conoce como *plano neutro*; en ella no se produce par y la reacción de la armadura debe cesar; sin embargo, la *inercia* hace que un objeto que se mueve conserve su movimiento, aun después de que la fuerza motriz ha sido retirada, por lo cual, la armadura sigue girando y pasa más allá del plano neutro. Pero cuando la armadura continúa, los lados de la espira comienzan a entrar a las líneas de flujo comprimiéndolas nuevamente. Como resultado, las líneas de flujo ejercen una fuerza que empuja hacia atrás los lados de la espira y se produce un par en la dirección opuesta. Así, en lugar de una rotación continua, se produce un movimiento oscilatorio hasta que la armadura se detiene en el plano neutro.

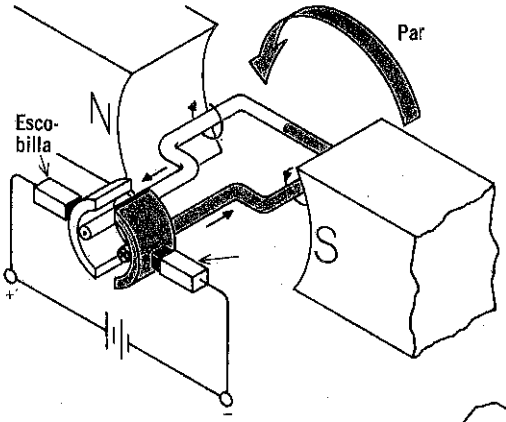


Cuando el plano de la bobina es perpendicular al campo, la armadura se encuentra en el plano neutro.

Si la armadura se encuentra en el plano neutro, la interacción magnética está en equilibrio y no se desarrolla par. Si se aplicara potencia a una armadura en reposo en el plano neutro, no se desarrollaría par y la armadura no giraría



Para obtener una rotación continua, es necesario que la armadura se mantenga girando en la misma dirección al pasar por el plano neutro, lo cual se logra invirtiendo la dirección del campo polar, o bien, la dirección del flujo de corriente que pasa a través de la armadura en el instante en que ésta pasa por el plano neutro. Las inversiones de corriente de este tipo suelen realizarse mediante dispositivos de cambio de circuito. Como el interruptor correspondiente tendría que sincronizarse con la armadura, resulta más lógico construirlo sobre la armadura que en el campo. El dispositivo interruptor práctico que puede cambiar la dirección del flujo de corriente en una armadura para mantener la rotación continua se llama *conmutador*.

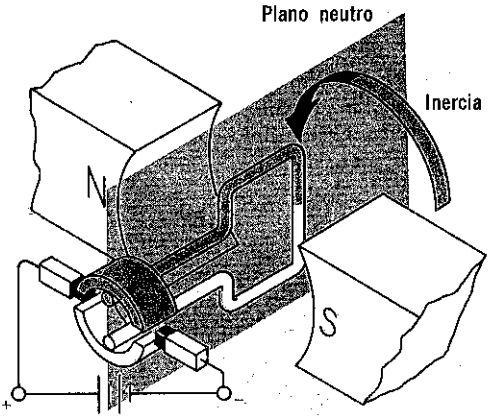


(A)

Corriente a través de la espira, que crea un par

(B)

En esta posición neutra, no hay creación de par; pero la inercia hace que la espira se mueva hacia (C), y se muestra en la página siguiente



el conmutador

En el caso de la armadura de una espira, el conmutador es un mecanismo sencillo. Consiste en un anillo conductor que se divide en dos segmentos, cada uno de los cuales está conectado a un extremo de la espira de armadura. La potencia para la armadura procede de una fuente externa de energía, por ejemplo una batería, y llega a los segmentos del conmutador por medio de escobillas. La disposición es casi idéntica a la del generador básico de c-c que se estudió en el volumen 6.

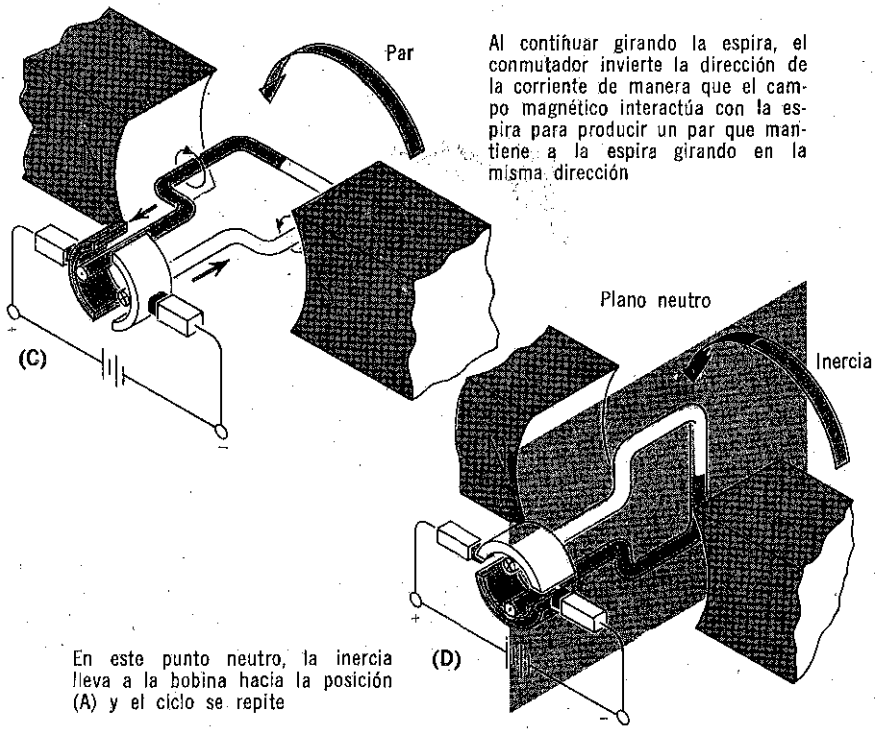
En las figuras se puede apreciar fácilmente el principio del funcionamiento del conmutador. En la figura A se puede ver que la corriente entra por el lado de la armadura que queda más cerca del polo sur y sale por el lado más próximo al polo norte. La interacción entre ambos campos produce un par en la dirección indicada y la armadura gira en esa dirección.

el conmutador (cont.)

La armadura que se muestra en la figura B de la página 7-8 está en el plano neutro; teóricamente no se produce par, pero la armadura sigue girando y pasa más allá del plano neutro debido a la inercia. Nótese que, en la posición neutra, el conmutador está desconectado de las escobillas. Una vez que la armadura rebasa el plano neutro, como se ilustra en la figura C, los lados de la espira han invertido sus posiciones, pero, debido a estas inversiones del conmutador, la dirección de la corriente en la armadura se mantiene igual que como la muestra la figura A. La corriente sigue entrando por el lado de armadura que ahora está más próximo al polo sur.

Como la dirección del campo del imán permanece invariable, la interacción de los campos después de la conmutación mantiene el par en la dirección original; de este modo, la rotación continúa en la misma dirección.

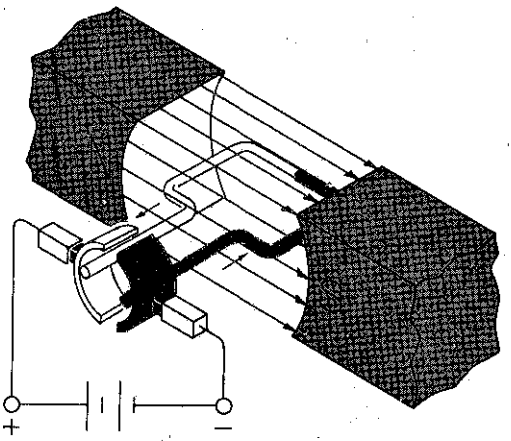
Según se aprecia en la figura D, la inercia impulsa nuevamente a la armadura, la cual pasa más allá del plano neutro y alcanza la posición ilustrada en la figura A de la página 7-8; mientras tanto, el conmutador hace que la corriente siga fluyendo en tal dirección que se mantenga la rotación en un mismo sentido. De esta manera, el conmutador continúa invirtiendo la corriente que fluye en la espira, de manera que el campo producido por ella siempre interactúa con el del polo y se produce un par continuo en la misma dirección.



motor elemental de c-c

Hasta este punto se han estudiado los cuatro elementos principales que constituyen el motor elemental de c-c. Estos elementos son iguales a los del generador básico de c-c, que se estudió en el volumen 6, a saber: un campo magnético, un conductor móvil, un conmutador y escobillas. En la práctica, el campo magnético puede proporcionarlo un imán permanente o un electroimán. En este libro, para la mayor parte de las descripciones de los diversos principios del funcionamiento del motor se supondrá que se usa un imán permanente. En otros casos, cuando se deba hacer énfasis en que el campo del motor se produce eléctricamente, se mencionará que se usa un electroimán. En todo caso, el campo magnético en sí, consta de líneas de flujo magnético que forman un circuito magnético cerrado. Las líneas de flujo salen del polo norte del imán, cruzan el entrehierro que hay entre los polos del imán, entran al polo sur y luego atraviesan el propio imán, regresando de nuevo al polo norte. Generalmente, el conductor móvil es una espira llamada *armadura*, la cual se coloca en el entrehierro que hay entre los polos del imán. Por lo tanto, la armadura está dentro del campo magnético.

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
FERNANDO
"ACERV"



Una sola espira en un campo magnético con potencia suministrada a través de las escobillas, a través de un conmutador de anillo partido, constituye la forma más elemental de c-c

Cuando se suministra potencia c-c a la armadura a través de las escobillas y el conmutador, también se origina un flujo magnético alrededor de la armadura. Este flujo de armadura es el que interactúa con el campo magnético donde está suspendida la armadura para producir el par que hace funcionar al motor.

resumen

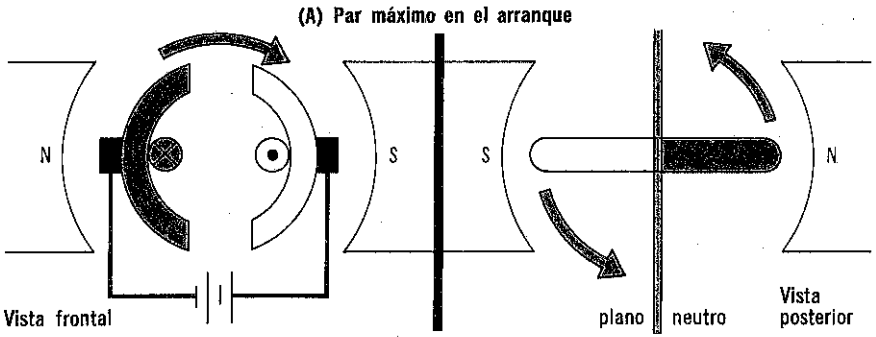
☐ Un motor eléctrico transforma la electricidad en movimiento rotatorio para efectuar trabajo útil. ☐ El primer motor eléctrico fue construido por Faraday en 1821. Aunque era un dispositivo ingenioso, no podía desempeñar trabajo práctico. ☐ Los motores elementales funcionan a base de la interacción de dos campos magnéticos: uno se produce alrededor de un conductor que lleva corriente y el otro es un campo magnético fijo. ☐ La regla de la mano izquierda para motores indica la dirección del campo magnético que rodea a un conductor con corriente. ☐ La regla de la mano derecha para motores indica la dirección en que un conductor con corriente se moverá dentro de un campo magnético.

☐ Un motor práctico debe producir movimiento rotatorio continuo. Esto lo hace originando una fuerza de giro o par, sobre un conductor que lleva corriente, al cual se le ha dado forma de espira. ☐ Cuanto mayor sea el par, más trabajo útil puede desempeñar el motor. ☐ El plano neutro de un motor es la posición en que la espira rotatoria está perpendicular a las líneas de flujo del campo magnético fijo. ☐ Cuando la espira rotatoria está en el plano neutro, no se produce par. ☐ Se usa en conmutador para mantener girando continuamente un motor de c-c, en lugar de que sólo oscile con respecto al plano neutro. El conmutador invierte la dirección de la corriente que fluye en la espira rotatoria cada vez que ésta atraviesa el plano neutro.

☐ Los cuatro elementos principales de un motor elemental de c-c son los siguientes: un campo magnético, un conductor móvil, un conmutador y escobillas. ☐ El campo magnético lo puede proporcionar un imán permanente, o bien, un electroimán. ☐ El conductor móvil es una espira y recibe el nombre de armadura. ☐ La corriente continua llega a la armadura a través de las escobillas y el conmutador.

preguntas de repaso

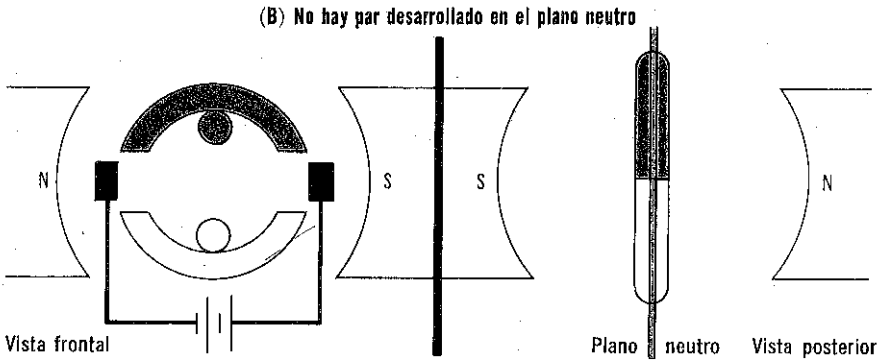
1. ¿Qué información aportaron los experimentos de Oersted sobre los efectos magnéticos de la electricidad?
2. ¿Por qué no era práctico el primer motor eléctrico de Faraday?
3. ¿Cuál es la *regla de la mano derecha para motores*?
4. ¿Cuál es la *regla de la mano izquierda para motores*?
5. ¿Qué es un *par*? ¿Por qué es importante en los motores?
6. ¿Qué es el *plano neutro*?
7. ¿Qué es *un conmutador*?
8. ¿Por qué son necesarios los conmutadores?
9. Dibuje el esquema de un motor elemental de c-c.
10. Describa brevemente cómo funciona el motor que dibujó para la pregunta 9.



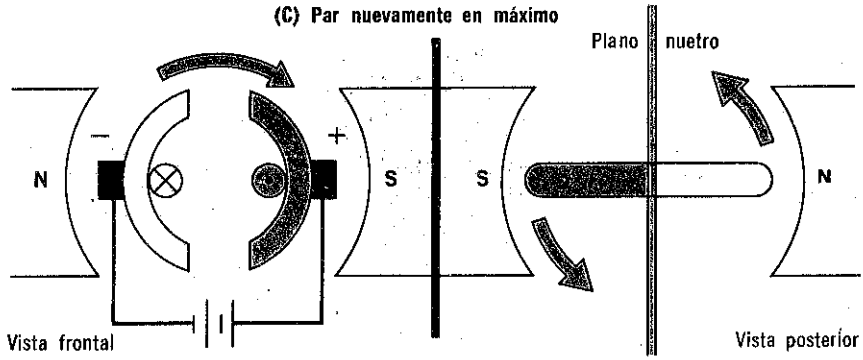
limitaciones del motor elemental de c-c

Se puede construir un motor elemental de c-c como el que se ha estudiado aquí, pero, aunque funcione, tiene dos importantes limitaciones que restringen su utilidad. En primer lugar, no siempre puede arrancar por sí solo y, una vez que está funcionando, lo hace en forma muy irregular.

El motor elemental de c-c tiene su armadura con una sola espira y cuando esta última está en el plano neutro, el motor no puede arrancar por sí solo. En el plano neutro no hay corriente en la armadura, ya que las escobillas están desconectadas del conmutador. Sin embargo, aunque se podría hacer que circule corriente en la armadura, debe recordarse que en el plano neutro, los flujos no interactúan. Como resultado, no se podría producir par y la inercia mantendría al motor en reposo.



El motor elemental de c-c desarrolla par irregularmente. Así pues, es ineficaz contra cargas reales. Puesto que no hay par desarrollado cuando la espira está en el plano neutro, el motor no arrancará por sí solo si la espira está en el punto neutro cuando se aplica potencia

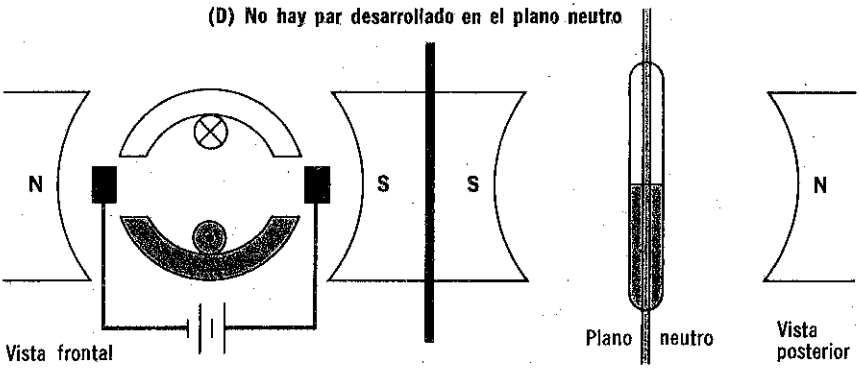


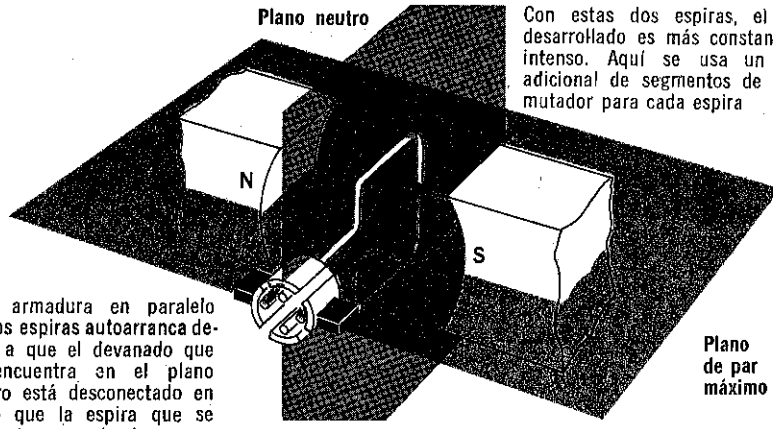
limitaciones del motor elemental de c-c (cont.)

Para poner en marcha el motor, es necesario quitar su armadura del plano neutro; al ponerla en cualquier otra posición, las escobillas se conectan nuevamente al conmutador; de este modo, fluye corriente en la armadura y se produce un par. Una vez que ha arrancado, el motor continúa funcionando hasta que se desconecta de la fuente de potencia.

Lo anterior se relaciona con la segunda limitación: cuando un motor elemental de c-c funciona, lo hace en forma irregular porque produce un par que también es irregular. El par máximo se produce sólo cuando el plano de la armadura de una sola espira es paralelo al del campo.

Esta posición forma ángulo recto con el plano neutro. Una vez que la armadura pasa este plano de par máximo, se produce un par cada vez menor hasta que llega nuevamente al plano neutro donde obviamente no hay par. La inercia lleva a la armadura hacia adelante del plano neutro y, en esta forma, el motor continúa girando. Sin embargo, por la irregularidad del par producido, no es factible que el motor elemental de c-c de una sola espira pueda tener aplicaciones prácticas.





Con estas dos espiras, el par desarrollado es más constante e intenso. Aquí se usa un par adicional de segmentos de conmutador para cada espira

Esta armadura en paralelo de dos espiras autoarranca debido a que el devanado que se encuentra en el plano neutro está desconectado en tanto que la espira que se encuentra en el plano que desarrolla par máximo está conectada

Plano de par máximo

motor c-c armadura de dos espiras

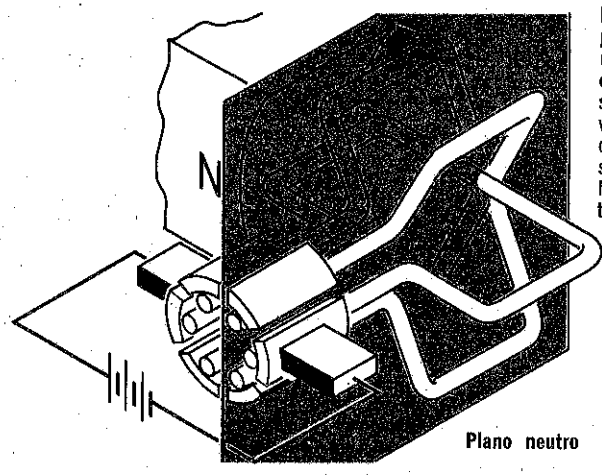
Se puede lograr que el motor elemental de c-c arranque por sí solo si se le instala una armadura de dos o más espiras. En este tipo de armadura, las espiras se colocan de modo que formen un ángulo recto entre sí; así, cuando una de ellas está en el plano neutro, la otra está en el plano de par máximo. En este caso, el conmutador está dividido en dos pares de segmentos, es decir, en cuatro partes; cada segmento está conectado con una terminal de cada espira de la armadura, con lo que se obtienen dos *circuitos de espira en paralelo*. Si se alimenta potencia a un conjunto de segmentos de anillo, por medio de un par de escobillas fijas, entonces habrá una sola espira conectada a la vez.

En esta armadura de espiras múltiples, el conmutador tiene dos funciones: sirve para que la corriente fluya en la espira manteniendo siempre la misma dirección; además, cambia la línea de alimentación de potencia, conectándola con la espira que se acerca a la posición de par máximo. Así, en la armadura de dos espiras, mientras la espira 2 se aproxima a la posición de par máximo, la espira 1 se acerca a la posición de mínimo par y el conmutador desconecta la espira 1, conectando la espira 2. La corriente fluye en la espira manteniendo la dirección que favorece la rotación continua. Al poco tiempo, conforme la espira 2 se aproxima al par mínimo, en tanto que la espira 1 nuevamente se aproxima al máximo, el conmutador invierte las conexiones de la espira 2 hacia la espira 1. Esta vez, también cambia la dirección de la corriente a través de la espira 1 para mantener la dirección original de rotación.

Con este tipo de armadura de espiras en paralelo, el motor arranca por sí solo, pero sigue funcionando en forma irregular debido a que, en un momento dado, sólo una espira suministra el par que impulsa al motor. Naturalmente, cuando el motor tiene dos espiras, el par que lo impulsa durante cada revolución es dos veces mayor que el de un motor con una sola espira. Sin embargo, el peso muerto de la segunda espira contrarresta la ventaja que representa el par adicional.

cómo aumentar la eficiencia de la armadura

Según se ha estudiado, al aumentar espiras a la armadura de un motor elemental de c-c, sólo se logra que éste se ponga en marcha por sí solo, no necesariamente que el motor funcione con la uniformidad requerida para que sea efectivo con carga. En un motor *elemental* con *un solo* par de escobillas, no importa cuantas espiras independientes se usen, sólo una de ellas lleva corriente a la vez y produce par para mover el motor. Por ejemplo, en un motor de tres espiras, la espira que produce el par debe mover el peso muerto de las dos espiras restantes. Para un funcionamiento realmente mejor, la corriente debe ser alimentada al mismo tiempo a todas las espiras de la armadura, excepto, naturalmente, a cualquiera de las espiras que esté en el plano neutro.

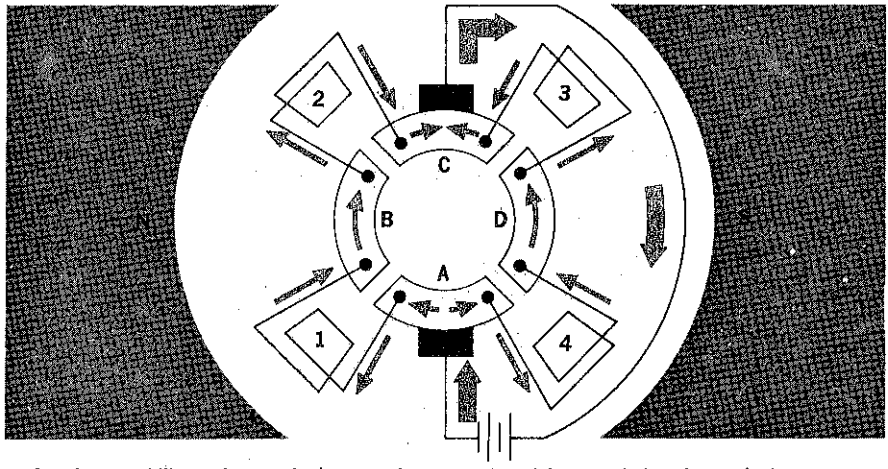


La armadura de tres espiras en paralelo que usa un conjunto de escobillas desarrolla par sólo en una bobina a la vez. Como resultado, las otras dos espiras representan peso muerto que hace ineficiente a este tipo de motor

Una solución aparentemente sencilla sería hacer un motor de tres espiras con una escobilla para cada segmento del conmutador. Con seis escobillas, sería posible alimentar corriente al mismo tiempo a todas las espiras de armadura. Como resultado, todas las espiras producirían par simultáneamente, mejorando el funcionamiento del motor. Sin embargo, el uso de seis escobillas no es una solución práctica, ya que el motor sería caro, voluminoso y su mantenimiento sería complicado. Por lo tanto, la solución más conveniente a este problema sería aquella en que se conservara un solo par de escobillas. Si se conectan las espiras de la armadura de tal modo que estén dispuestas como circuito en serie, entonces se podrá usar un solo par de escobillas para que simultáneamente se alimente corriente a todas las espiras. Como resultado, todos los devanados originarán par al mismo tiempo, favoreciendo el funcionamiento del motor. Según se explicará más adelante, la mayor parte de los motores de c-c tienen un solo juego de escobillas y muchas espiras de armadura conectadas en varias disposiciones en serie-paralelo.

motor de c-c con armadura de cuatro espiras

En la figura se muestra el diagrama de un motor práctico de cuatro espiras. Dicho diagrama sirve para que el lector comprenda cómo está dispuesto el circuito eléctrico. Primero, note que las espiras están conectadas con segmentos adyacentes del conmutador. Asimismo, observe que las conexiones están dispuestas de tal manera que la combinación de espiras y segmentos del conmutador constituyen *un* gran circuito *en serie*. En la armadura de dos espiras en paralelo que se estudió antes, cada extremo de las espiras estaban conectadas con segmentos opuestos del conmutador. Como resultado, donde se necesitaba *un par* de segmentos por cada espira, ahora sólo se necesita *un segmento por cada espira*.

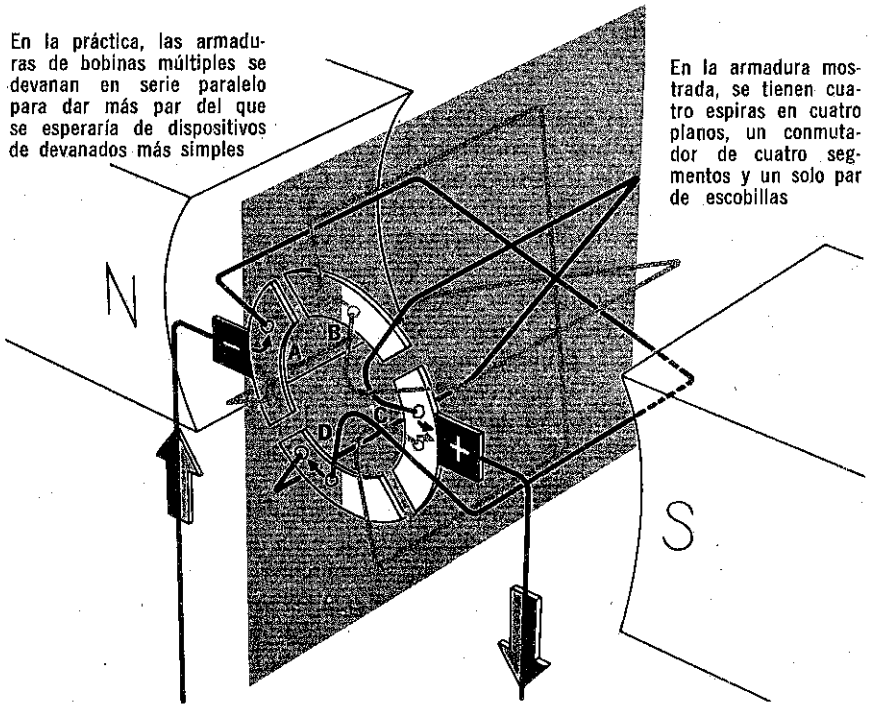


Con las escobillas sobre cualquier par de segmentos del conmutador, la corriente pasa a través de todas las espiras al mismo tiempo. En esta disposición de devanado, ninguna espira es retirada del circuito en favor de otra. Todas las espiras, por lo tanto, trabajan juntas para producir un par máximo

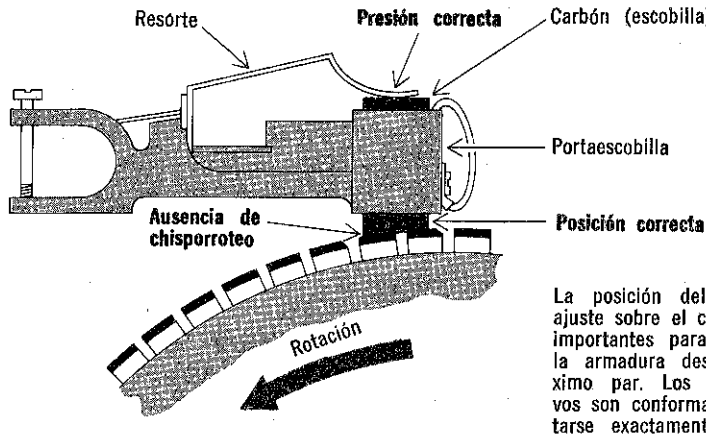
En el caso de la armadura de cuatro espiras, esto significa que sólo se necesitan cuatro segmentos de conmutador para el devanado en serie. El devanado en paralelo requeriría otros segmentos. Si ahora se agregan escobillas al conmutador en segmentos opuestos A y C, la armadura quedará dividida en dos circuitos en serie, que están en paralelo entre sí: un circuito en serie constituido por el segmento A, la espira 1, el segmento B, la espira 2, y el segmento C; este circuito está en paralelo con el circuito en serie que forman el segmento C, la espira 3, el segmento D, la espira 4, y el segmento A. Así pues, cuando la corriente fluye en el circuito como se ilustra en el dibujo, los cuatro devanados llevarán la corriente y cooperarán para facilitar el funcionamiento del motor. En este tipo de armadura, las escobillas son más anchas que las separaciones entre los segmentos del conmutador, de manera que el circuito nunca se abre cuando las escobillas pasan de un segmento al siguiente.

funcionamiento

Si se examina detalladamente la ilustración del motor práctico de c-c, se observará que la armadura aparece en una posición en la cual ninguno de sus devanados se encuentra en el plano neutro; por lo tanto, todos los devanados pueden contribuir al par del motor. Naturalmente, para que todos los devanados produzcan par, deben estar alimentados con corriente simultáneamente. Si se sigue la trayectoria que se describirá a continuación, se comprenderá cómo se logra esto. Comenzando en la terminal negativa de la fuente de potencia, la corriente atraviesa la escobilla negativa, pasa a los dos juegos en paralelo de devanados en serie, luego a la escobilla positiva y regresa nuevamente a la terminal positiva de la fuente de energía. Nótese que hay un circuito completo para que la corriente fluya a través de todos los devanados, igual que en el diagrama de la página anterior. En realidad, ambos circuitos son idénticos.



Cuando se produce un par, la armadura gira y no tarda en tomar una posición donde una de sus espiras queda en el plano neutro. En este punto, debe producirse la conmutación. Según se explicará en seguida, la técnica de conmutación en el motor práctico de c-c difiere ligeramente de la que se estudió para el motor elemental de c-c.



La posición del carbón y el ajuste sobre el conmutador, son importantes para asegurar que la armadura desarrolle el máximo par. Los carbones nuevos son conformados para ajustarse exactamente al contorno del conmutador sobre el cual habrán de usarse

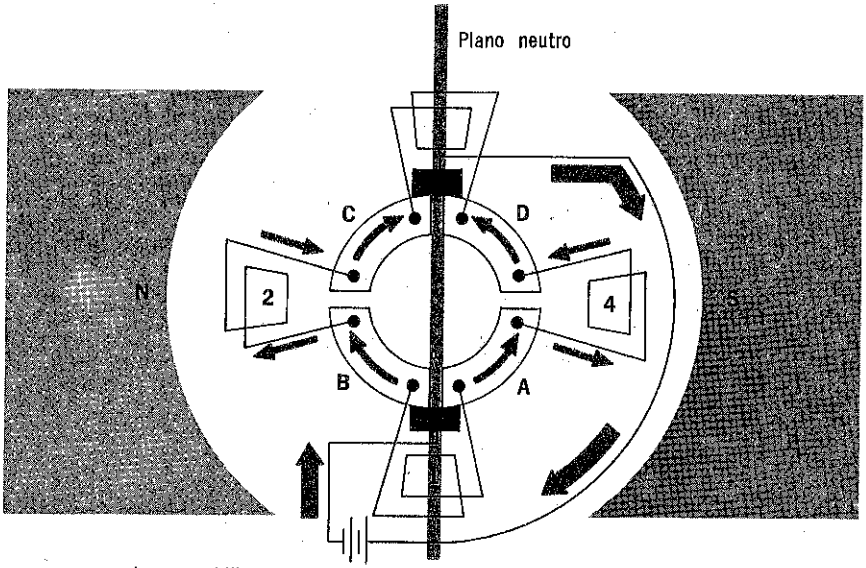
conmutación

En el estudio de la conmutación en el motor elemental de c-c de una sola espira, se explicó que el conjunto de conmutador y escobilla funciona como un interruptor de inversión, abriendo y cerrando. Primero, las escobillas se *desconectan* del segmento del conmutador cuando la espira entra al plano neutro, antes de ser *reconectada* a segmentos opuestos cuando la espira pasa por el plano neutro. En esta operación, primero se abría un circuito con corriente y luego se completaba nuevamente. Estas acciones de interrupción producen un arco en el punto de interrupción. Así pues, en el motor elemental, generalmente hay mucho arqueo y chisporroteo entre las escobillas y el conmutador, lo que produce puntos de quemadura en el conmutador y que las escobillas se desgasten rápidamente. La vida útil de este motor, entre reparaciones, se acortaría.

En motores prácticos de c-c, la interrupción en el conmutador quita la corriente de la espira que atraviesa el plano neutro con mínimo de arqueo, lo cual se logra, en parte, mediante una escobilla que conecte en corto la espira en el instante en que se encuentra en el plano neutro. Debido a que la espira se encuentra en el plano neutro durante la conmutación y existe interacción mínima o nula con el flujo del campo, la diferencia de potencial a través de la espira también es mínima. Esto significa que, cuando la escobilla se conecta en corto con la espira que está en el plano neutro y luego reestablece el circuito con flujo de corriente en la nueva dirección, las operaciones de cerrar y abrir se hacen en puntos de potencial casi idéntico, de manera que la conmutación ocurre con un mínimo de arqueo y chisporroteo. Manteniendo el periodo de duración del corto a un mínimo absoluto, se asegura que el par sólo se pierda durante el instante en que la espira se encuentra en el plano neutro y que el motor funcione a la mayor velocidad de funcionamiento posible.

conmutación en la armadura de cuatro espiras

La conmutación en un motor práctico de c-c con armadura de cuatro espiras se lleva a cabo haciendo que las escobillas conecten en corto segmentos contiguos del conmutador para interrumpir el flujo de corriente en una espira de armadura asociada, cuando ésta pasa por el plano neutro. Cuando la conmutación se lleva a cabo debidamente, el motor funciona a la máxima velocidad posible y con el mínimo de chisporroteo. Según se ilustra, en el sistema aplicado en motores prácticos, cuando un par de espiras, por ejemplo 1 y 3, llega al plano neutro, éstas se conectan en corto de manera que dejan de transmitir corriente. Al mismo tiempo, las otras dos espiras, 2 y 4, siguen conectadas en este circuito y siguen llevando corriente.

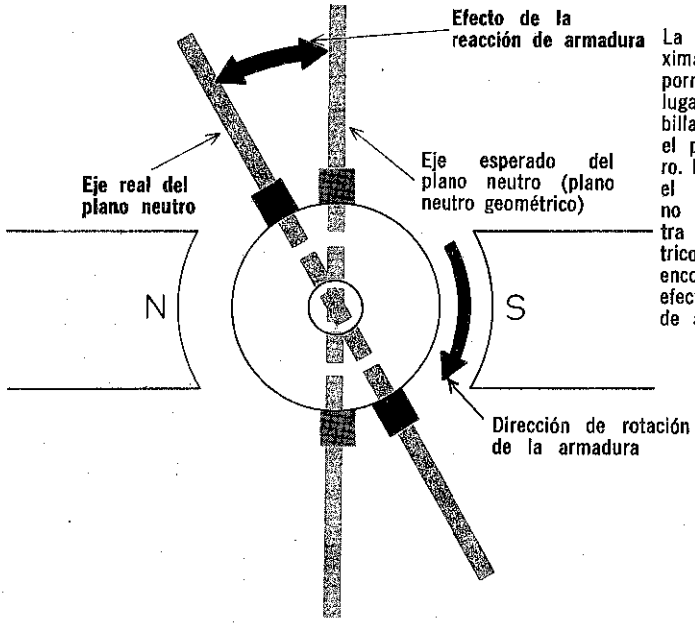


Las escobillas conectan en circuito corto los segmentos del conmutador que alimentan las espiras en el plano neutro. Estas espiras, por lo tanto, no llevan corriente en el punto en que no pueden producir par. Las otras espiras llevan sus corrientes normales y suministran el par para mantener la rotación de la armadura

Nótese que, debido a la disposición simétrica y al funcionamiento del conmutador y las escobillas, dos de los devanados de armadura siempre están en corto circuito en un instante determinado. Como resultado, en la práctica, las armaduras se devanan intencionalmente de manera que los pares de devanados afectados por la acción de las escobillas lleguen al plano neutro simultáneamente.

plano neutro

Del estudio de la conmutación en el motor práctico de c-c, se recordará que el arqueo producido durante el funcionamiento del motor se mantiene al mínimo, debido a que hay una diferencia de potencial mínima en una espira de armadura cuando se encuentra en el plano neutro. Como lo indica la figura que representa un motor de dos polos, el plano neutro debe encontrarse en el eje que forme ángulo recto con las líneas de flujo del campo y debe estar a la mitad de las piezas polares. A veces, a este eje se le llama *plano neutro geométrico* del motor. El plano neutro en un motor es el mismo para todas las espiras de la armadura. Cada espira atraviesa el plano neutro dos veces por cada revolución completa de la armadura.



La operación a la máxima velocidad con chisporroteo mínimo, tiene lugar cuando las escobillas están alineadas con el plano neutro verdadero. En un motor práctico, el eje de conmutación no siempre se encuentra en el neutro geométrico donde se esperaría encontrarlo, ya que los efectos de la reacción de armadura lo alteran

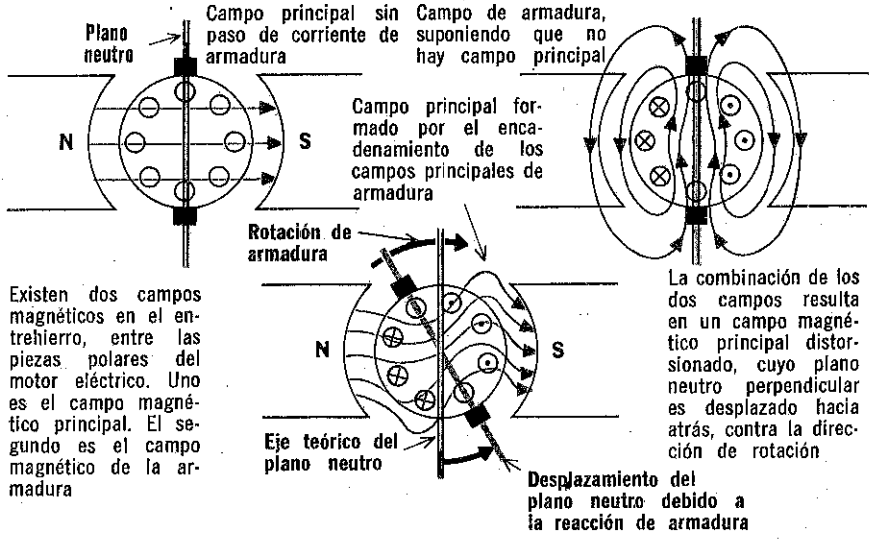
Teóricamente, pues, para lograr la conmutación perfecta, el plano donde se colocan las escobillas del motor, llamado el *eje de escobillas,* debe coincidir idealmente con el eje del plano neutro del motor. Sin embargo, en la práctica, la posición del plano neutro real tiende a desplazarse del eje geométrico neutro cuando el motor funciona.

El desplazamiento depende de la velocidad y dirección del funcionamiento del motor. Por lo tanto, el eje de escobillas se moverá hacia la nueva posición del plano neutro, o bien, tendrán que tomarse medidas para evitar que el plano se desplace. La causa principal de este desplazamiento del plano neutro cuando el motor funciona es un efecto que se conoce como *reacción de armadura.*

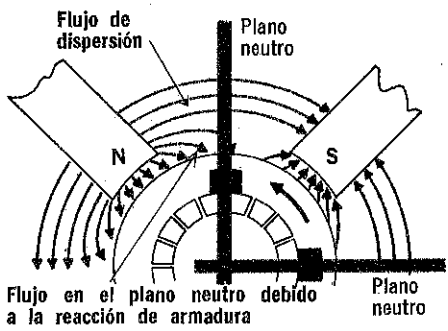
reacción de armadura

Cuando la armadura de un motor lleva corriente, se establece un flujo magnético alrededor de los conductores del devanado de armadura. Así pues, se tienen dos campos magnéticos en el espacio que hay entre las piezas polares de campo: el campo magnético principal y el campo producido por la armadura. Estos dos campos se combinan para producir un nuevo *campo magnético resultante*. En este caso, el campo resultante se distorsiona de tal manera que se desplaza en sentido opuesto a la dirección de rotación de la armadura. Esta distorsión del campo original se llama *reacción de armadura*. Como el plano neutro del motor está en ángulo recto con el flujo del campo, resulta que éste también se desplaza en dirección opuesta a la de rotación de la armadura.

La magnitud de reacción de armadura determina la cantidad de desplazamiento del plano neutro. La reacción de armadura varía según la cantidad de corriente que circula por ella. Cuanto mayor sea la corriente, mayor será el desplazamiento del plano neutro con respecto al plano neutro geométrico. En forma similar, la dirección de desplazamiento depende de la dirección de flujo de corriente en la armadura.

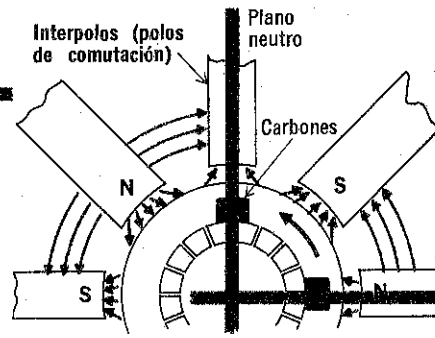


Si el motor debe funcionar a velocidad constante y en una sola dirección, las escobillas pueden ubicarse en la nueva localización del plano neutro y quedar en esa posición para obtener una conmutación efectiva. Pero si el motor ha de funcionar a diferentes velocidades, direcciones y con cargas variables, la corriente en la armadura variará considerablemente. En consecuencia, la reacción de armadura también variará y con ella la posición del plano neutro. Esto significa que, para una conmutación efectiva, la escobilla debe cambiar de posición cada vez que cambie el plano neutro. Es obvio que esto constituiría un procedimiento sumamente complicado.



Los polos de conmutación producen un campo local en el plano neutro que se interponen al flujo producido por la reacción de armadura para restaurar el plano neutro original

Los polos de conmutación se usan en los motores prácticos de c-c para contrarrestar la reacción de armadura



interpolos

Cuando un motor funciona a varias velocidades, en diferentes direcciones o contra cargas variables, la corriente de armadura y la reacción de armadura también varían. Para que un motor como éste funcione con conmutación eficiente, se requeriría un cambio en la posición de las escobillas para cada desplazamiento del plano neutro. Como este realineamiento constante de escobillas es poco práctico, los motores necesitan alguna forma de mantener el plano neutro en una posición y que no se desplace como resultado de la reacción de armadura. Una solución a este problema es usar devanados especiales llamados *polos de conmutación* o *interpolos.*

Los interpolos son piezas polares de electroimanes especiales colocadas en el eje del plano neutro, entre las piezas polares principales. Los devanados de los interpolos se conectan en serie con el devanado de armadura, de manera que la corriente de armadura establece campos magnéticos en ellos. Las direcciones de estos campos son tales que anulan los campos magnéticos producidos alrededor de las bobinas de armadura cerca de los interpolos y contrarrestan la tendencia de la reacción de armadura a desplazar el plano neutro. Como resultado, el plano neutro se mantiene lo suficientemente cerca del plano neutro geométrico para todas las modalidades en que funcione el motor.

El hecho de que los devanados de los interpolos estén en serie con la armadura hace que se autorregulen; los interpolos proporcionarán la cantidad apropiada de campo de anulación para cada serie distinta de condiciones. Por ejemplo, en el caso de altas corrientes de armadura, en las cuales la reacción de armadura es grande y, también es grande la tendencia a desplazar el plano neutro, entonces el campo de interpolos que anula el desplazamiento también será fuerte. Lo contrario ocurre en bajos niveles de corriente de armadura.

resumen

☐ El motor elemental de c-c no arranca por sí solo cuando la espira de armadura está en el plano neutro; esto se debe a que allí no ocurre interacción de flujos. ☐ Debido a la pérdida de par que ocurre siempre que la espira atraviesa el plano neutro, el motor elemental de c-c funciona en forma irregular una vez que está en marcha. ☐ Cuando una armadura se forma de dos espiras que están en ángulo recto entre sí, por lo menos una de éstas siempre produce par para que el motor se ponga en marcha por sí solo; sin embargo, este tipo de motor también funciona en forma irregular debido al efecto del plano neutro. ☐ Cuando se usa una armadura con tres o más espiras y éstas se conectan en serie, de manera que cada espira, excepto la que se encuentra en el plano neutro, lleva corriente, se produce un par más constante.

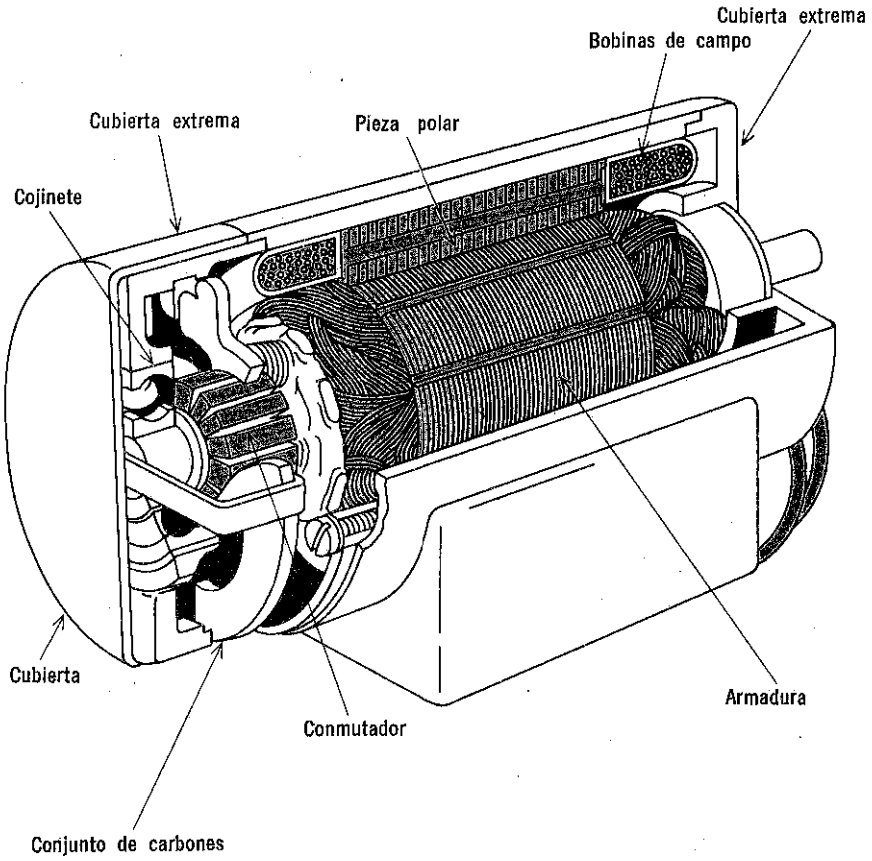
☐ Los motores prácticos están provistos de armaduras de espiras múltiples con dispositivos en serie-paralelo para obtener un funcionamiento uniforme. ☐ En los motores prácticos, para eliminar el arqueo en las escobillas y producir la velocidad máxima del motor, la conmutación se efectúa cuando la espira atraviesa el plano neutro; las escobillas se conectan en corto con la espira para eliminar el arqueo del circuito.

☐ El eje de escobilla no se puede colocar siempre sobre el plano neutro geométrico debido al efecto de la reacción de armadura, que tiende a desplazar el plano neutro. ☐ En el caso de motores de velocidad relativamente constante, se pueden colocar las escobillas en el plano neutro desplazado; pero en el caso de motores de velocidad variable, debe usarse algún artificio, interpolos por ejemplo, para mantener el plano neutro en una sola posición.

preguntas de repaso

1. En el motor elemental de una sola espira, ¿por qué en el plano neutro no interactúa el flujo de armadura con el de campo?
2. ¿Por qué el motor de armadura con dos espiras arranca por sí solo?
3. ¿Funciona uniformemente un motor elemental con armadura de dos espiras? ¿Por qué?
4. Si se agregan espiras, ¿cómo se dispondrían los circuitos de espiras con un juego de escobillas para que el motor funcione de manera uniforme? ¿Por qué?
5. ¿Qué puede hacerse para obtener un funcionamiento uniforme con un motor de espiras múltiples si no se usara la disposición de circuito de espiras en serie?
6. ¿Cuál es la desventaja de usar las escobillas para energizar a las espiras y alejarlas del plano neutro? ¿Por qué ocurre esto?
7. ¿Por qué es aceptable e inocuo que una espira se conecte en corto en el plano neutro?
8. ¿Qué es *reacción de armadura* y por qué desplaza al plano neutro?
9. ¿En qué dirección se desplaza el plano neutro a causa de la reacción de armadura?
10. ¿Cómo contrarrestan los interpolos la reacción de armadura?

Vista en corte de un motor c-c práctico



estructura

En lo que se ha estudiado hasta ahora, se han introducido los principios del funcionamiento de los motores de c-c. Al estudiar el funcionamiento eléctrico del motor de c-c, también se inició el estudio de la mayor parte de los elementos físicos principales del motor de c-c. Estos elementos son la armadura y el conmutador, el conjunto de escobillas y el imán del campo. A continuación se describirán los detalles referentes a la estructura de los motores de c-c, lo cual permitirá identificar las diferentes partes de motores reales. También se estudiará la estructura del motor analizando sus partes materiales y los métodos que se usan para construirlas. Finalmente se evaluarán algunos de los métodos empleados para el mantenimiento de motores.

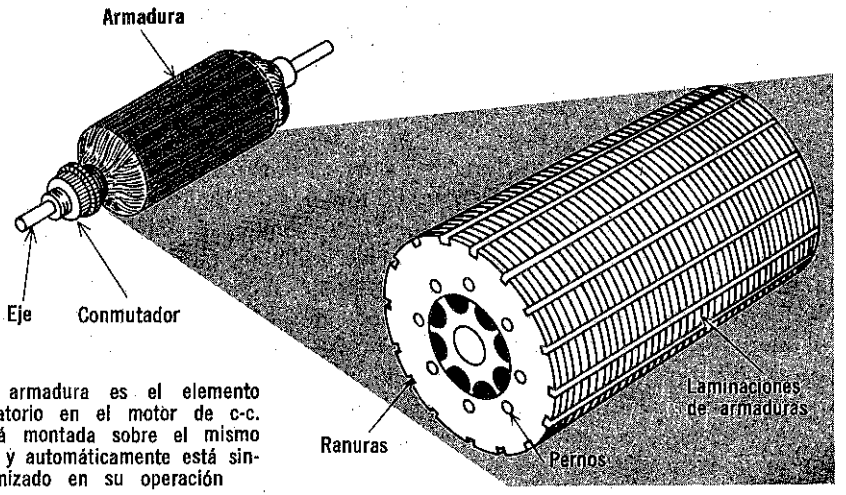
núcleo de armadura y eje

El término *armadura* o *rotor* se aplica a la parte giratoria del motor. Cuando se observa un motor en marcha, generalmente se ve el eje que gira. El eje es una extensión externa de la armadura que pasa a través de la cubierta y coraza del motor; se encuentra en el lado opuesto al extremo del conmutador del motor. El conmutador se describirá posteriormente.

Un núcleo de armadura típico es un cilindro sólido que tiene ranuras y está hecho de metal. En realidad, el núcleo está formado por delgadas láminas prensadas de acero dulce. Cada una de las laminaciones tiene muescas en la orilla; están revestidas con un barniz aislante y comprimidas para formar el núcleo. En el proceso de formación, las muescas se alinean de manera que el núcleo acabado tiene una serie de ranuras longitudinales en todo su perímetro. Las laminaciones se usan en el núcleo con objeto de reducir pérdidas por corrientes parásitas.

Las corrientes parásitas son las que se inducen en un material conductor cuando éste corta líneas de flujo magnéticas (véase el volumen 3). Las laminaciones reducen el área donde pueden existir corrientes parásitas y, en consecuencia, aumenta la resistencia relativa del material; así pues, se reducen las pérdidas de potencia debidas a corrientes parásitas. El uso de acero dulce como material del núcleo reduce las *pérdidas por histéresis* que, según se recordará de lo estudiado en el volumen 3, ocurren cuando las inversiones de magnetización del material del núcleo están atrasadas con respecto a las inversiones de la corriente.

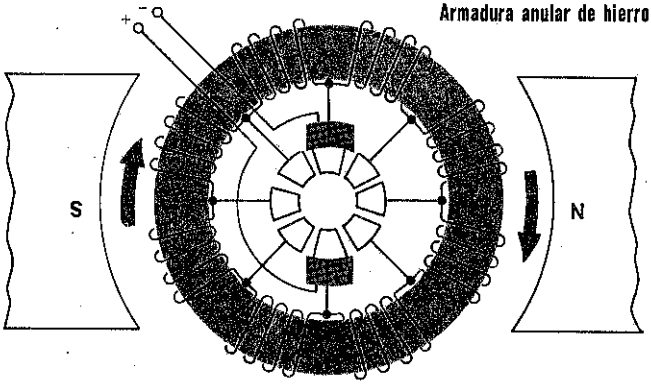
Las ranuras del núcleo ya formado sirven para alojar las espiras de alambre de cobre o devanados de la armadura. El núcleo de armadura está montado sobre el eje del motor, el cual generalmente es una barra de acero duro con superficie interna de contacto muy bien pulida. El método de montaje del núcleo sobre el eje varía considerablemente, según los distintos motores.



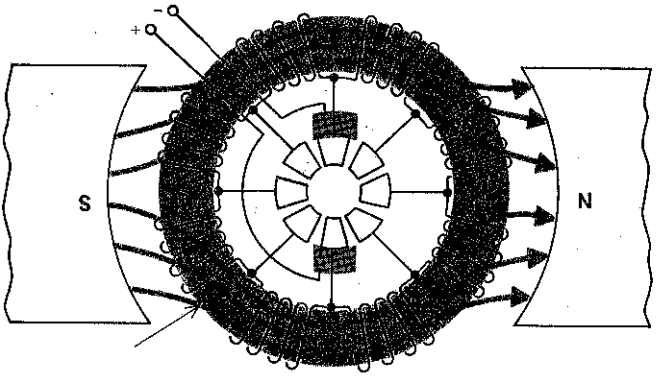
La armadura es el elemento rotatorio en el motor de c-c. Está montada sobre el mismo eje y automáticamente está sincronizado en su operación

devanado anular de gramme

Devanar armadura es toda una ciencia. A continuación, se señalarán algunos aspectos importantes del tema, los cuales serán útiles cuando se estudien las diferencias y semejanzas básicas que hay entre los motores de c-a y los de c-c.

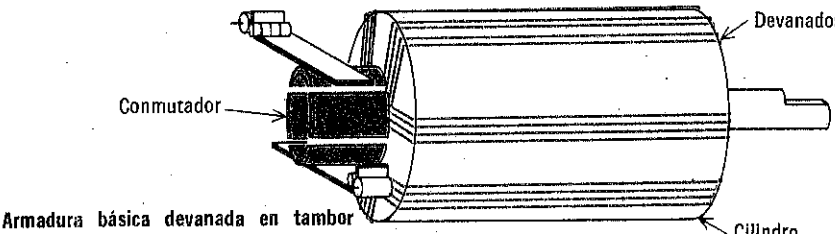


La armadura devanada en forma anular se volvió obsoleta debido a una desventaja inherente: la armadura de anillo actuaba como su propio blindaje limitando la interacción entre el flujo de armadura y el campo. Esto afectaba la eficiencia de los motores de armadura de anillo



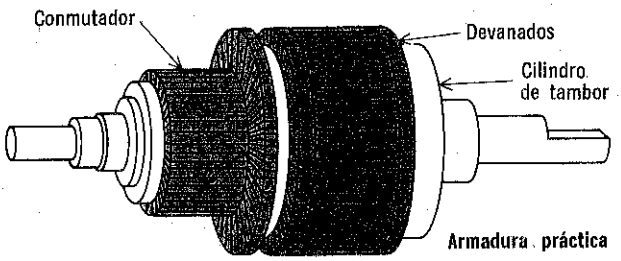
El efecto de blindaje de la armadura de anillo que evitaba la acción recíproca con el flujo, dentro del anillo

Los devanados de armadura de c-c se clasifican en *devanados de anillo* y *devanados de tambor*, según la forma que tenga el núcleo de la armadura. Los primeros motores prácticos tenían el llamado *devanado de anillo de Gramme*. En el devanado de anillo de Gramme el núcleo de armadura es un anillo de hierro, alrededor del cual se embobina un devanado continuo y cerrado que se conecta con segmentos del conmutador a intervalos regulares. Este tipo de armadura es ineficiente debido a que los conductores de la mitad interior del anillo están blindados magnéticamente por el hierro y, en consecuencia, no pueden interactuar con el campo. Debido a ésta y a otras desventajas, actualmente la armadura de anillo de Gramme es poco menos que una curiosidad de laboratorio.



Armadura básica devanada en tambor

En la armadura de tambor, el núcleo de armadura es cilíndrico y las bobinas —que generalmente son preformadas— se colocan longitudinalmente sobre ella. Algunas veces, los detalles de los devanados no son obvios de la simple observación de una armadura terminada



Armadura práctica devanada en tambor

armadura devanada en tambor

En lugar del anillo de Gramme, la mayor parte de los motores modernos tienen el núcleo de armadura en forma de tambor, el cual se estudió previamente.

Las espiras o bobinas que constituyen la armadura devanada en tambor se hallan alrededor del núcleo de la armadura, alojando los lados de las bobinas en las ranuras del núcleo. Las ranuras suelen estar aisladas con papel de pescado para proteger los devanados. En muchas armaduras, las bobinas son formadas previamente para darles su forma definitiva y luego se colocan en las ranuras del núcleo. A esto se le llama *devanado de formas* y se lleva a cabo ya sea conformando las bobinas sobre un molde de madera o doblándolas en una prensa antes de colocarlas sobre el tambor. Cada devanado siempre es igual que otro en la armadura y, al final, la armadura devanada siempre debe ser perfectamente simétrica.

Después de que las bobinas de armadura se han colocado sobre el núcleo, en la ranura del núcleo se ponen cuñas de material aislante para fijar las bobinas. Después de esto, se usan bandas adhesivas de acero para asegurar las bobinas de manera que no sean expulsadas por la fuerza centrífuga producida durante la rotación de la armadura.

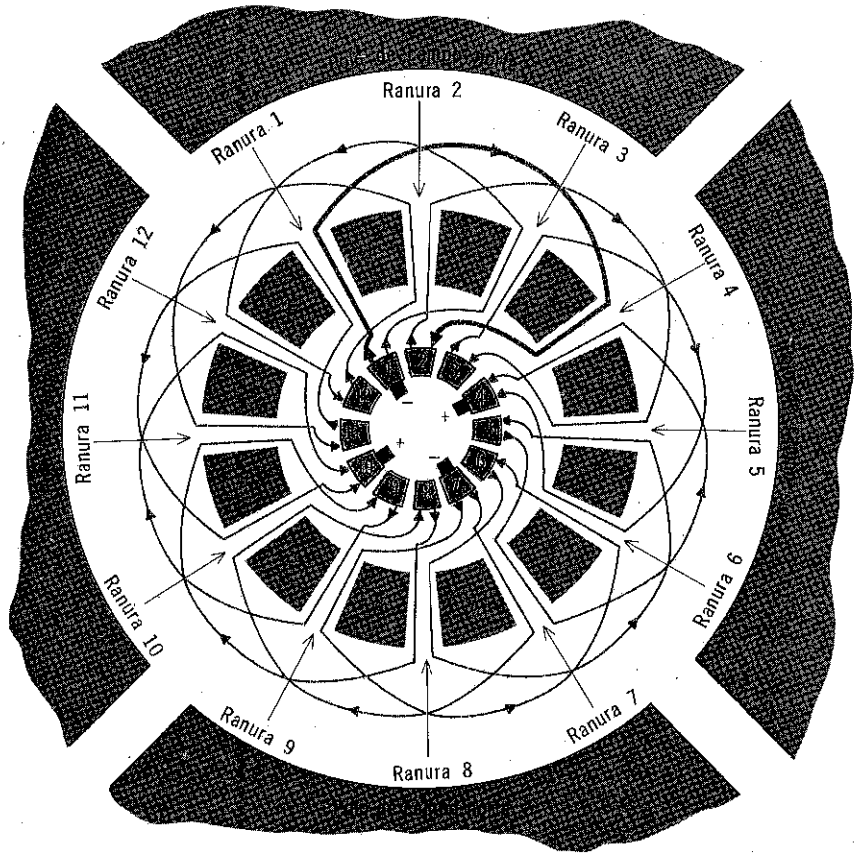
Básicamente, hay dos formas en que se dispone el devanado de los tambores en uso: *Devanados imbricados* y *devanados ondulados*. El imbricado se usa para motores de baja tensión y alta corriente. El ondulado se usa en motores que requieren alta tensión y baja corriente.

devanados imbricados

El devanado imbricado tiene ese nombre por la forma en que el devanado recorre hacia adelante y hacia atrás la armadura de tambor. En este devanado, un elemento de bobina va hacia adelante y se coloca bajo un polo de campo sur. Para comprender en qué consiste el devanado imbricado, observe el diagrama que aparece en esta página, recorriéndolo como sigue:

Empezando por la bobina dibujada en línea más gruesa, la cual sale del segmento 1 del conmutador, pasa por la ranura 1, luego atraviesa la ranura 4 y regresa al conmutador en el segmento 2. Note que la bobina empieza y termina en segmentos adyacentes del conmutador; pero, al hacerlo, pasa por otras ranuras que se encuentran bajo polos opuestos. Compruebe que con las demás bobinas sucede lo mismo.

Ahora obsérvese el diagrama y note que existen cuatro trayectorias paralelas que recorren la armadura.

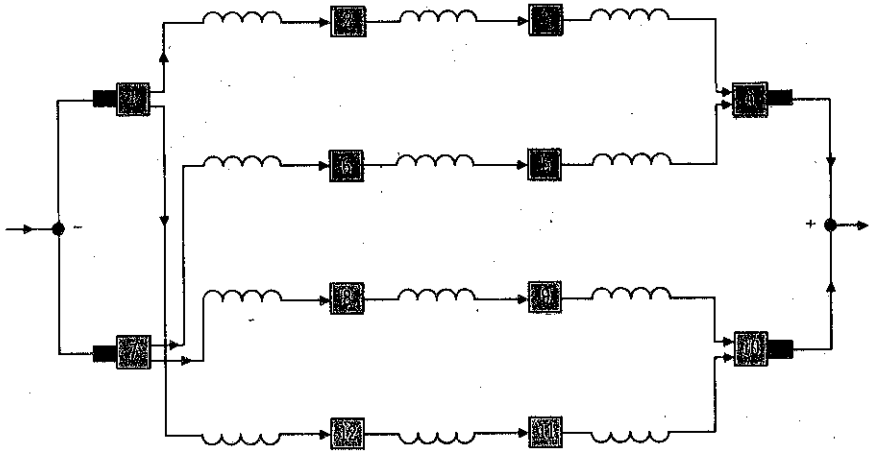


devanados imbricados (cont.)

Las cuatro trayectorias paralelas en la armadura son:

1. De la escobilla que está sobre el segmento 1 en la terminal negativa hacia los devanados de la trayectoria 2-3 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 4 en el lado positivo.
2. De la escobilla que está sobre el segmento 1, hacia los devanados de la trayectoria 12-11 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 10, en el lado positivo.
3. De la escobilla que está sobre el segmento 7, en el lado negativo, hacia los devanados de la trayectoria 6-5 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 4, en el lado positivo.
4. De la escobilla que está sobre el segmento 7, en el lado negativo, hacia los devanados de la trayectoria 8-9 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 10, en el lado positivo.

Esto demuestra que los doce devanados llevan corriente simultáneamente y, por lo tanto, todos contribuyen al mismo tiempo al movimiento del motor.



Un motor de cuatro polos con devanado imbricado en su armadura, tiene cuatro carbones. También tiene cuatro trayectorias paralelas en los devanados, cada uno de los cuales lleva corriente y contribuye al par en la operación del motor

Aunque actualmente se usan muchas clases de devanados imbricados, hay dos características comunes por las que se pueden distinguir todos ellos, cuando se encuentran en motores prácticos:

1. Los motores con armadura imbricada generalmente tienen el mismo número de escobillas que de polos.
2. En los motores con armadura imbricada, ésta generalmente tiene el mismo número de trayectorias paralelas que de polos.

Estas reglas pueden verificarse haciendo referencia a las ilustraciones de estas dos páginas.

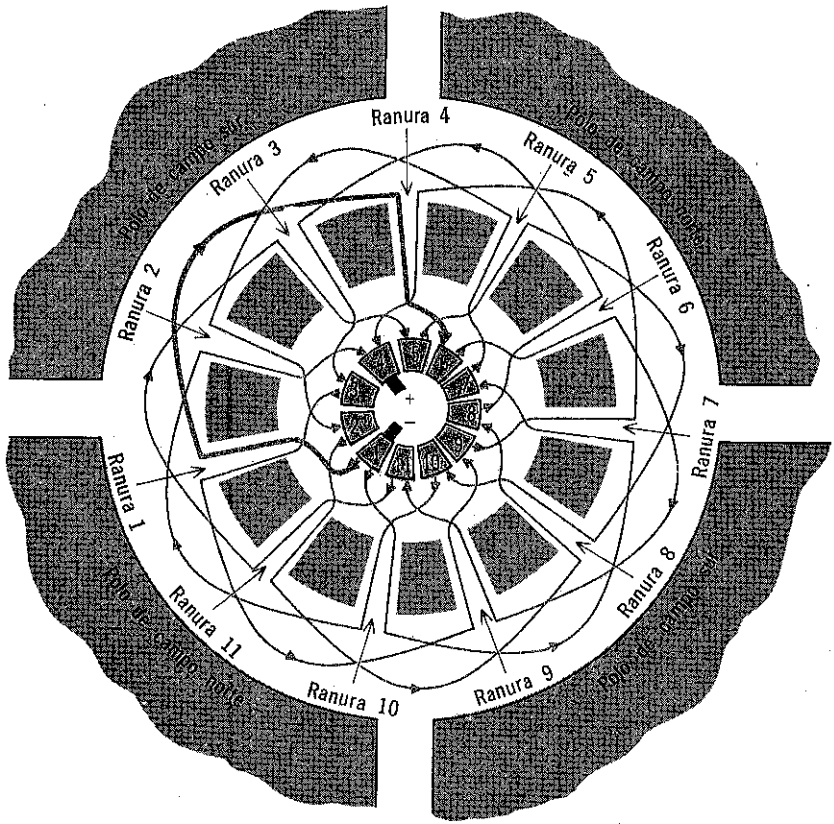


Diagrama del embobinado

devanados ondulados

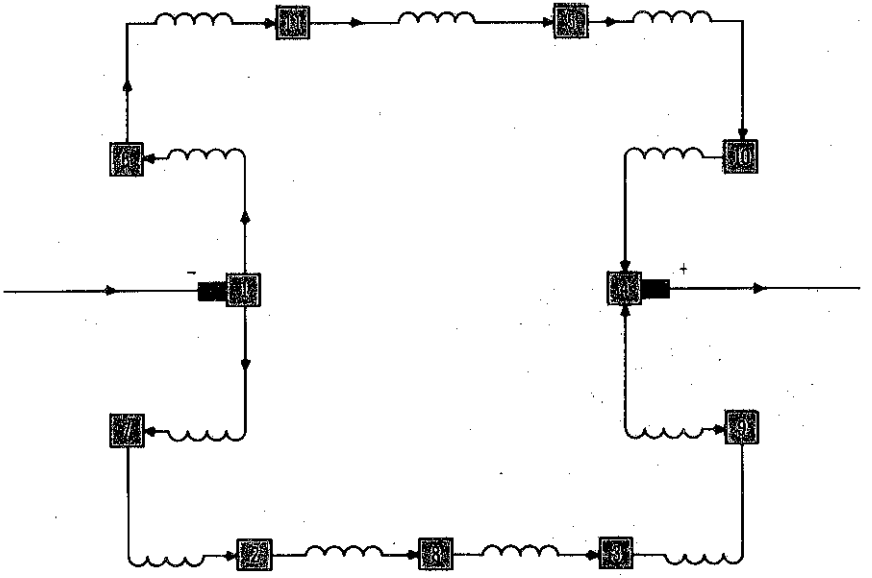
El devanado ondulado debe su nombre de la apariencia de los devanados en el tambor. Como en el caso del devanado imbricado, se pueden encontrar muchas variedades de devanados ondulados. Sin embargo, hay dos características comunes a todos ellos:

1. Los motores con armaduras de devanado ondulado sólo requieren un mínimo de dos escobillas. Sin embargo, en algunas variaciones, pueden tener el mismo número de escobillas que de polos, igual que el motor de armadura imbricada.
2. En armaduras de devanados ondulados, sólo hay dos trayectorias paralelas a lo largo de un devanado ondulado completo, independientemente del número de escobillas o polos que se usen.

devanados ondulados (cont.)

Estas dos características saltan a la vista en el esquema de una armadura con devanado ondulado y en el diagrama de su alambrado. Si se observa uno de estos diagramas se notará que hay dos trayectorias paralelas en el devanado; y son las siguientes:

1. De la escobilla que está sobre el segmento 1, en el lado negativo, hacia los devanados de la trayectoria 6-11-5-10 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 4 del lado positivo.
2. De la escobilla que está sobre el segmento 1, en el lado negativo, hacia los devanados de la trayectoria 7-2-8-3-9 y, luego, a la escobilla que está sobre el segmento 4 del lado positivo.



Los motores con armaduras en devanado ondulado que tienen conjuntos múltiples de polos, necesitan sólo un grupo de carbones. Este hecho ayuda a reconocer cuándo se usa un devanado de armadura de tipo ondulado en un motor particular de c-c

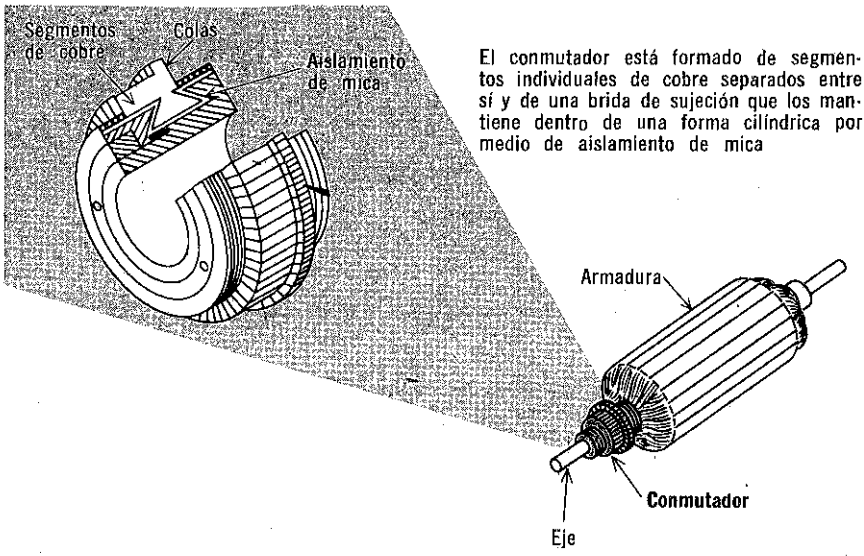
Al rastrear la disposición de los devanados ondulados en los diagramas de alambrado, probablemente se encuentre la diferencia más significativa entre los devanados ondulados y los imbricados. Por ejemplo, observando la bobina dibujada en línea más gruesa, se notará que sus extremos terminan en los segmentos 1 y 4 del conmutador, los cuales están *notablemente separados*. Téngase presente que en la armadura imbricada los extremos del devanado terminan en *segmentos adyacentes*.

Otro punto interesante es el hecho de que, para un motor de 4 polos, sólo se pueden usar 11 devanados ondulados; en comparación, se pueden acomodar 12 devanados imbricados.

el conmutador

El conmutador consta de *segmentos* conductores particulares hechos de cobre y aislados entre sí con láminas delgadas de *mica*. Cada segmento, con sus separadores de mica, se monta en un molde cilíndrico y se sujeta a las demás por medio de una *brida* de sujeción. Los segmentos se aíslan de la brida de sujeción mediante anillos de mica.

Las puntas de las bobinas de armadura se conectan a las partes sobresalientes de los segmentos de conmutador, las cuales se conocen como *colas*. Algunos segmentos del conmutador se fabrican sin colas y, en su lugar, tienen ranuras en los extremos, a los cuales se conectan las puntas de la bobina de armadura. Después de armado el conmutador, se tornea la superficie en forma perfectamente cilíndrica y se pule hasta darle un acabado muy terso, lo cual asegura que la fricción entre la superficie de conmutación y las escobillas sea al mínimo. Finalmente, y esto es de gran importancia, el aislamiento de mica entre los segmentos se recorta de modo que quede ligeramente abajo de la superficie de los segmentos del conmutador, a fin de que no interfiera el paso de las escobillas.

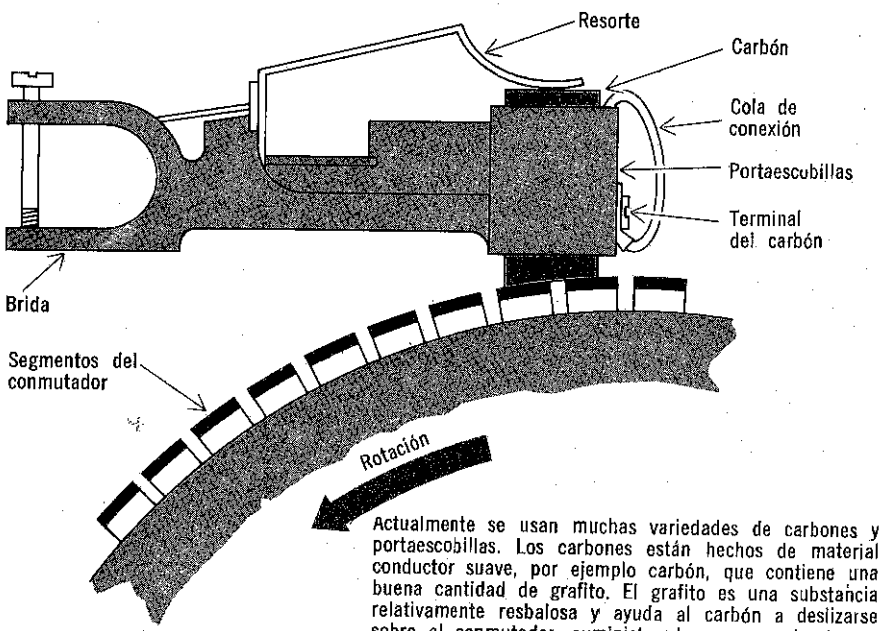


El conmutador está formado de segmentos individuales de cobre separados entre sí y de una brida de sujeción que los mantiene dentro de una forma cilíndrica por medio de aislamiento de mica

Generalmente, después de que un motor ha estado en servicio durante algún tiempo, la superficie de cobre del conmutador se desgasta. Para que el motor funcione satisfactoriamente, siempre que el cobre se desgasta hasta el nivel de la mica, es necesario recortar nuevamente a esta última. Al mismo tiempo, generalmente también es necesario tornear el conmutador, para que mantenga su forma cilíndrica.

conjunto de escobillas

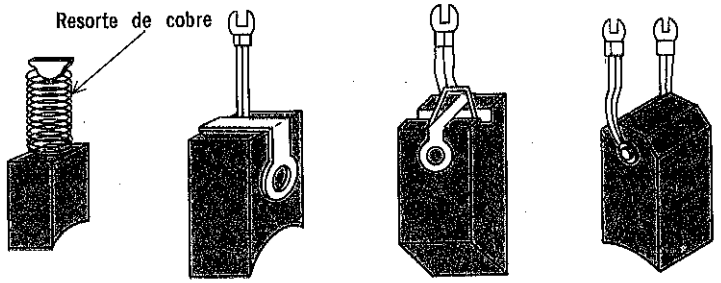
El *conjunto de escobillas* está formado por las escobillas o carbones, sus sujetadores y resortes de escobillas. Las escobillas propiamente dichas están hechas de carbón suave que contiene una gran proporción de grafito. Este material tiene dos objetivos: es lo suficientemente suave para que el conmutador sólo se desgaste al mínimo; al mismo tiempo, es lo suficientemente duro para que la escobilla no se desgaste con demasiada rapidez. Nunca debe aplicarse lubricación entre las escobillas y el conmutador, pues la que pudiera necesitarse la proporciona el grafito de las escobillas.



Actualmente se usan muchas variedades de carbones y portaescobillas. Los carbones están hechos de material conductor suave, por ejemplo carbón, que contiene una buena cantidad de grafito. El grafito es una substancia relativamente resbalosa y ayuda al carbón a deslizarse sobre el conmutador, suministrando una especie de acción de lubricación

Generalmente, las escobillas están montadas cada una en una pieza llamada *portaescobillas*. Estas piezas mantienen una posición fija y están montadas en la cubierta del motor, aunque aisladas de ella. La escobilla se coloca holgadamente en el portaescobillas y un resorte la empuja para que no pierda contacto con el conmutador. El ajuste flojo y la presión del resorte hacen posible que las escobillas tengan cierta libertad de movimiento en sus sujetadores, de manera que puedan ajustarse a las pequeñas irregularidades de la superficie del conmutador.

En muchos motores la presión del resorte se puede ajustar según la especificación del fabricante. Si la presión es excesiva, las escobillas se desgastarán demasiado rápidamente. Si es insuficiente, se hará mal contacto, lo cual también producirá chisporroteo y operación irregular del motor.

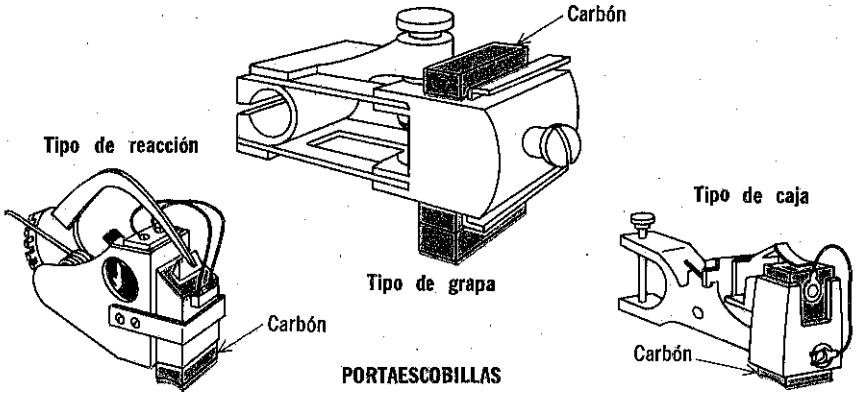


TIPOS DE CARBONES

conjunto de escobillas (cont.)

En la mayor parte de los motores, la conexión eléctrica entre las escobillas y la fuente externa de potencia es como sigue: las escobillas propiamente dichas están conectadas eléctricamente a sus portaescobillas respectivos por medio de alambres de cobre prensado, llamados "colas de puerco". A su vez, los sujetadores están conectados a *pernos* que van en el exterior de la cubierta del motor. Tanto los portaescobillas como los pernos están aislados de la cubierta misma. Los pernos constituyen los puntos de unión a los cuales se pueden conectar las terminales de potencia al motor.

Aunque las escobillas están diseñadas para durar largo tiempo, siempre se hacen de manera que se desgasten más rápidamente que el conmutador, debido a que es más barato y fácil substituir las escobillas que reparar una armadura. Generalmente se hacen escobillas de bastante longitud, de manera que puedan mantenerse en servicio durante un periodo relativamente largo antes de que queden desgastadas hasta el punto en que sea necesario substituirlas. El resorte mantiene a la escobilla firmemente apoyada contra el conmutador durante toda su vida útil.



PORTAESCOBILLAS

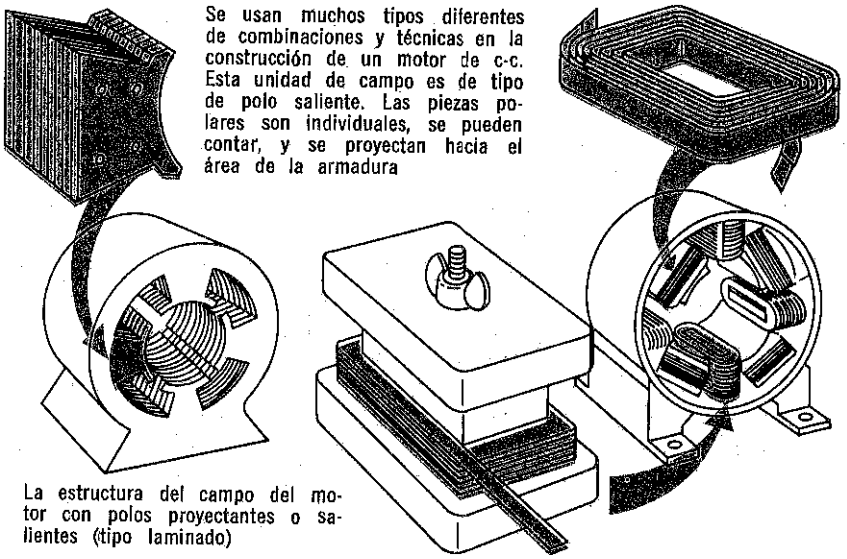
devanado de campo

Campo es un nombre común para designar el campo magnético polar en el cual gira la armadura. El campo puede originarlo un imán permanente o, como en la mayor parte de los motores prácticos, un electroimán. La corriente que fluye en el electroimán tiene la misma fuente de energía que la corriente de armadura.

El conjunto de campo consta de *piezas polares* y *bobinas de campo*. Las piezas polares de campo generalmente están atornilladas a la circunferencia interna de la cubierta y hechas de láminas de acero dulce que han sido *laminadas* para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas. Las piezas polares suelen tener la forma que se ajusta a la curvatura de la armadura, para mantener que sea lo más pequeño posible el entrehierro entre las piezas polares y la armadura, ya que el aire ofrece una reluctancia relativamente elevada a las líneas de flujo magnético.

La mayor parte de los motores de c-c tienen piezas polares independientes llamadas *polos salientes* que sobresalen hacia el interior, al área de armadura. El devanado de campo de un motor de polos salientes consta de todas las bobinas de campo particulares devanadas alrededor de sus núcleos, o sea, las piezas polares. El número de bobinas de campo determina el número de polos del motor. Un motor de dos polos tiene dos bobinas de campo; un motor de cuatro polos tiene cuatro, etc.

En algunos motores, el devanado de campo no está formado en polos salientes, sino que está distribuido alrededor del marco del campo: los devanados están dispuestos de tal manera que, cuando se les suministra potencia se obtienen polos magnéticos fijos. Los devanados de campo en circuitos de este tipo se encuentran en los llamados motores de ca-cc que se estudian posteriormente, en este mismo volumen.



Se usan muchos tipos diferentes de combinaciones y técnicas en la construcción de un motor de c-c. Esta unidad de campo es de tipo de polo saliente. Las piezas polares son individuales, se pueden contar, y se proyectan hacia el área de la armadura

La estructura del campo del motor con polos proyectantes o salientes (tipo laminado)

cubierta y montaje

Todas las cubiertas de motor soportan y protegen las partes interiores del motor. Sin embargo, no todas las cubiertas son semejantes

Cubierta a prueba de explosión
para usarse en atmósferas explosivas

Cubierta sumergible

Debido a que los motores son tan versátiles, la cubierta debe construirse de manera que sea compatible con toda clase de ambientes de trabajo

La cubierta del motor constituye el soporte mecánico para las diversas partes del motor. También protege las partes móviles de influencias exteriores tales como polvo, suciedad y agua. La mayor parte de las cubiertas de los motores constan de tres partes: una *cubierta de campo* y dos *cabezales*. La cubierta de campo sirve de soporte para las bobinas de campo y los interpolos, si existen. También forma parte del circuito magnético del devanado de campo. Debido a esta función magnética, la cubierta de campo está hecha de hierro y acero de buenas propiedades magnéticas.

La armadura debe estar suspendida en el campo de manera que pueda girar dentro de él. La cubierta proporciona el soporte básico por medio de los cojinetes montados en ranuras de cada uno de los cabezales para hacer posible la rotación con la mínima pérdida de potencia por fricción. Los cabezales están montados en ambos extremos del cuerpo del campo y atornillados a él.

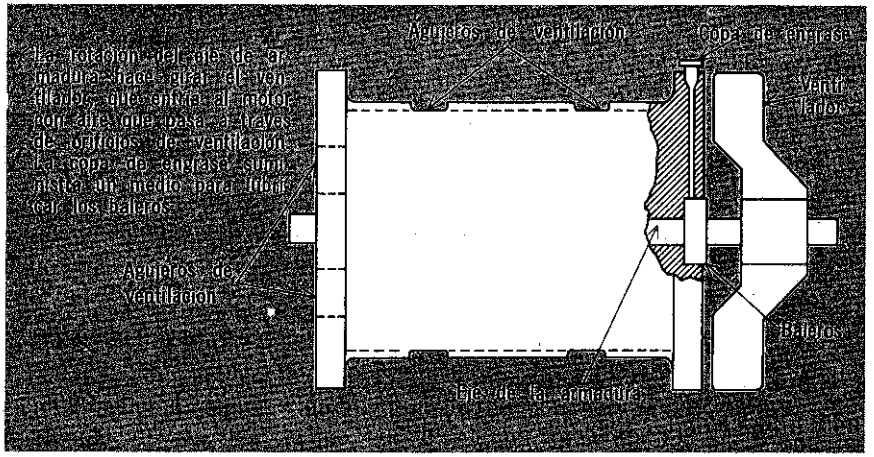
En los cabezales de algunos motores se hacen orificios o accesorios para aceite o grasa, para que sea posible lubricar los cojinetes. La cubierta también es el sostén de los conjuntos de escobillas y de campo.

La cubierta también constituye el soporte externo del motor; tiene varios accesorios para montar el motor y está construida en formas especiales a fin de que resista más bien a las partes activas del motor y queden bien protegidas contra los diversos ambientes donde habrá de usarse el motor. Generalmente se hacen orificios de ventilación en los cabezales y, con frecuencia, también en la parte central, para que pueda circular el aire de enfriamiento del motor.

chumaceras y enfriamiento

Dos de las características estructurales más importantes de los motores eléctricos son los *cojinetes* y los dispositivos internos para *enfriamiento*. Los cojinetes sostienen la armadura y permiten que la rotación a alta velocidad sea suave y con un mínimo de fricción. Cuando se usan *baleros,* éstos se montan a presión en los extremos del eje de la armadura y en la suspensión de los cabezales. Cuando se usan *cojinetes metálicos,* éstos simplemente se colocan en la suspensión de los cabezales y el eje pulido de la armadura se ajusta al cojinete. Cuando los cabezales se atornillan a la parte central en el armado de la cubierta, la armadura queda sostenida automáticamente por los cojinetes de los cabezales.

Los cojinetes de algunos motores están hechos de modo que tengan lubricación permanente, para toda la vida del motor. En otros motores se cuenta con algún medio para lubricar periódicamente los cojinetes. Generalmente, para este objeto se construyen dispositivos o copas de engrase en los cabezales. La lubricación periódica de un motor es quizá la parte más importante del mantenimiento del motor.



Cuando un motor funciona, suele producir una cantidad considerable de calor. Este debe disiparse rápidamente si se desea que el motor tenga una larga vida de servicio. El método más común para disipar este calor es mediante orificios de ventilación y un *ventilador* integrado al motor. Los orificios se encuentran en los cabezales y en el cuerpo central, para ventilar las partes internas que llevan corriente. El ventilador es una rueda con aletas que generalmente está montada en un extremo del eje de la armadura. Cuando la armadura gira, el ventilador saca aire por los orificios de ventilación y de esta manera extrae el calor de la cubierta.

resumen

☐ El rotor o núcleo de la armadura está hecho de lámina de acero dulce para reducir al mínimo las corrientes circulantes y las pérdidas por histéresis. ☐ El núcleo de la armadura tiene ranuras para sujetar las espiras devanadas. ☐ Se pueden usar devanados de anillo o bien, de tambor, pero este último es el más comúnmente empleado. Los devanados pueden hacerse directamente sobre el núcleo de la armadura o primero en moldes y colocados después en su lugar. ☐ Se usa "papel de pescado" para aislar las ranuras y las bobinas se fijan en su lugar con cuñas, adhesivos y bandas de acero.

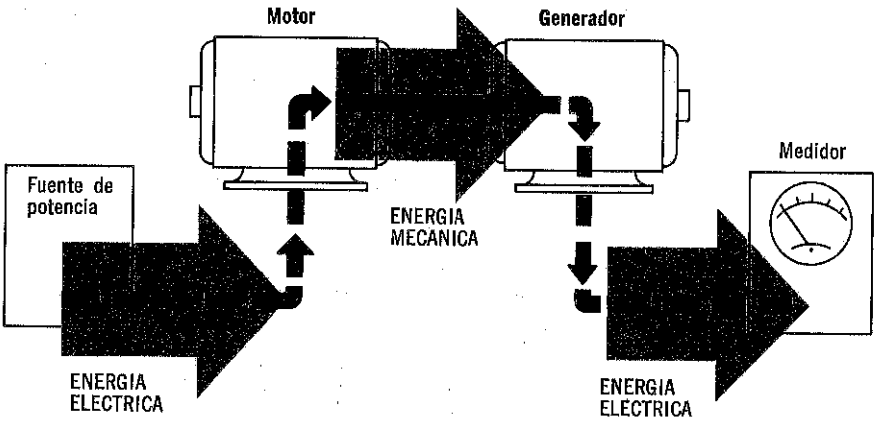
☐ Las bobinas de armadura se conectan al conmutador en forma de devanados imbricados, ondulados, o ambos combinados. ☐ Los devanados imbricados se usan en motores de baja tensión y alta corriente; los devanados ondulados, en motores de alta tensión y baja corriente. ☐ El conmutador se compone de segmentos de cobre separados por hojas de mica recortadas. ☐ Cada extremo de los devanados de espira se conecta a su propia cola de segmento, de manera que hay dos segmentos para cada espira. ☐ La corriente es alimentada a un conmutador tersamente pulido por medio de escobillas de grafito que se deslizan de un segmento a otro.

☐ El devanado de campo se puede montar sobre polos salientes laminados, o bien, distribuirse alrededor de la cubierta central del campo. ☐ La cubierta, del motor está formada por la cubierta de campo y los dos cabezales. ☐ Sobre los cabezales están los cojinetes que sostienen al eje de la armadura; la cubierta de campo contiene al devanado de campo.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo se hacen el núcleo de armadura y los polos de campo para reducir las corrientes parásitas y pérdidas por histéresis? ¿En qué forma ayuda esto?
2. ¿Cómo se hacen los devanados preformados?
3. ¿Cuándo se usan devanados imbricados y cuándo devanados ondulados?
4. ¿Qué tipo de devanado tiene sus extremos conectados a segmentos adyacentes del conmutador? ¿De qué manera difiere esto del otro tipo de devanado?
5. ¿De qué manera difieren los devanados imbricado y ondulado en cuanto a la relación existente entre el número de escobillas y polos? ¿Cómo difieren sus trayectorias paralelas de corriente?
6. ¿Cuál es la relación que hay entre el número de segmentos del conmutador y los devanados de la armadura?
7. ¿Por qué se recorta el aislamiento de mica entre los segmentos?
8. ¿Por qué se hacen las escobillas de grafito suave? ¿Por qué es importante la presión de la escobilla?
9. ¿Qué son *polos salientes*?
10. ¿Por qué el eje de la armadura es de acero duro muy bien pulido?

comparación entre motores y generadores



Los motores y generadores son opuestos. Si se alimenta electricidad a un motor, el motor produce energía mecánica. Si se impulsa un generador con energía mecánica, produce electricidad

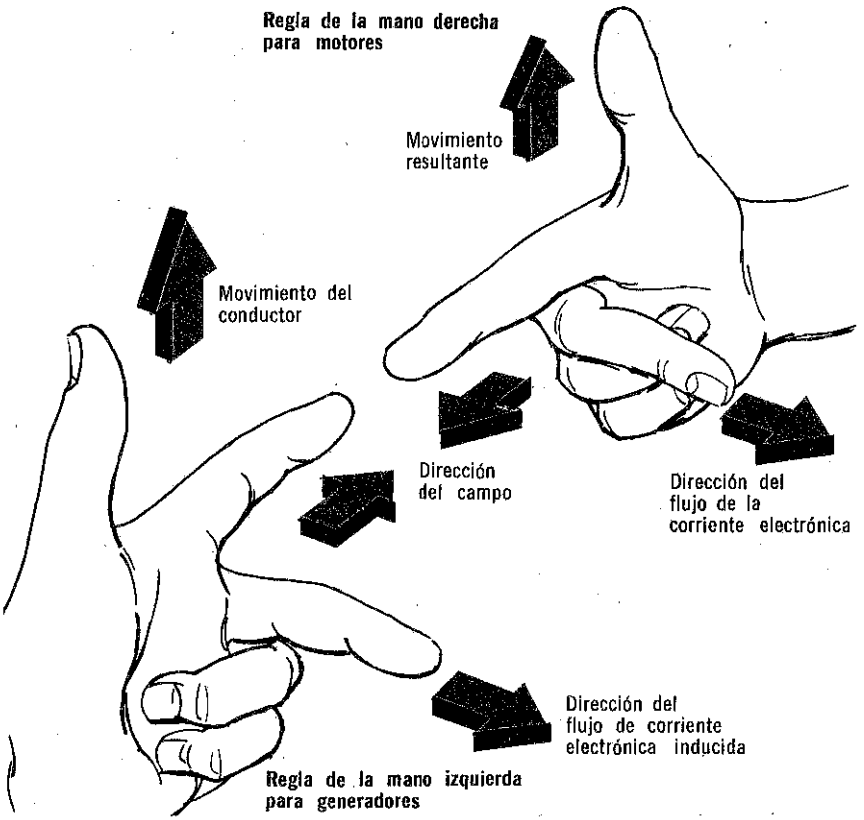
A partir de todo lo estudiado hasta el momento acerca de motores de c-c, probablemente el lector ha llegado a la conclusión de que el motor de c-c que se ha estudiado está muy relacionado con el generador de c-c que se explicara en el volumen 6. El motor es una máquina que transforma electricidad en movimiento; mientras que el generador hace lo contrario: es una máquina que transforma el movimiento en electricidad.

Para efectuar estas funciones opuestas, el motor de c-c y el generador disponen de las mismas partes esenciales: un devanado de campo fijo, una armadura rotatoria con conmutador y un conjunto de escobillas. En efecto, si se alimenta corriente eléctrica a un generador, éste funcionará como motor e impulsará una carga mecánica. De la misma manera, si se hace girar el eje de un motor de c-c con una fuente adecuada de energía mecánica —por ejemplo. una turbina de vapor o un motor de gasolina— entonces funcionará como generador.

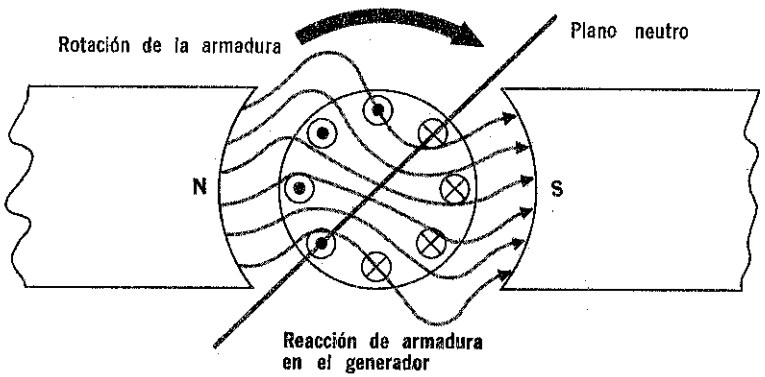
Aunque en general sus estructuras son similares, algunas características físicas de los motores y de los generadores difieren en algunos detalles prácticos, ya que se usan para diferentes cosas. Los métodos de montaje constituyen una diferencia notable. El generador suele hallarse cerca de su fuente de energía mecánica y muy a menudo se monta en una posición horizontal conveniente. Por otra parte los motores tienen tantas aplicaciones diferentes que el número de posiciones concebibles para montarlos es ilimitado.

regla de la mano izquierda para generadores y regla de la mano derecha para motores

La regla de la mano izquierda para generadores, es comparable a la regla de la mano derecha para motores, lo cual indica el tipo de relaciones que hay entre generadores y motores. En ambas reglas, el dedo índice señala la dirección del campo, el pulgar la dirección de movimiento del conductor y el dedo medio determina la dirección del flujo de la corriente.



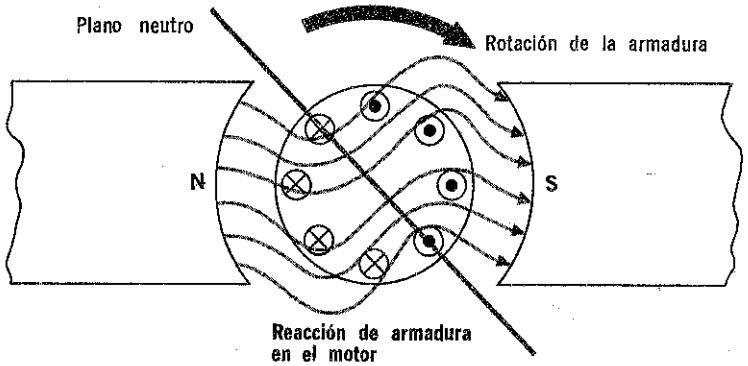
Del estudio de las reglas se saca una importante conclusión: si dos de las magnitudes son iguales en un generador y un motor, la tercera será opuesta. En la ilustración, el movimiento y el flujo de corriente tienen la misma dirección en ambos; por lo tanto, las direcciones del campo en los dos, serán opuestas.



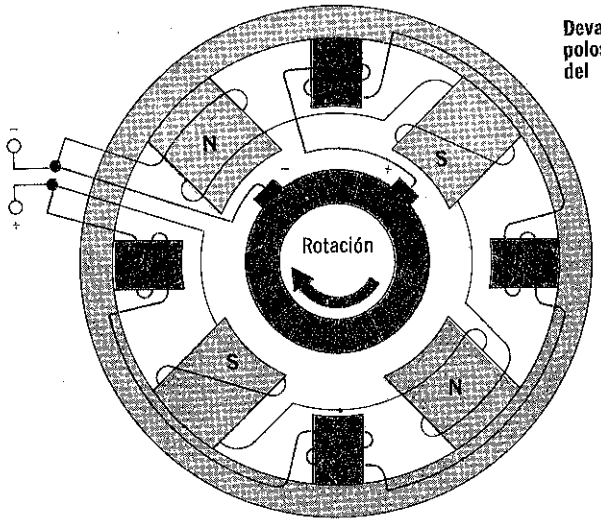
La reacción de armadura en el generador es opuesta a la de un motor. El plano neutro se desplaza hacia adelante, en la dirección de rotación

reacción de armadura

Aunque la comparación que se ha hecho de motores y generadores indica que su funcionamiento es convertible, casi nunca sucede que un motor se use como generador o viceversa. Esto se debe a que la reacción de armadura en los *motores* desplaza al plano neutro *hacia atrás,* en sentido opuesto a la dirección de rotación, mientras que en los *generadores,* el plano neutro se desplaza *hacia adelante,* o sea, en la misma dirección que la rotación. Como resultado, si se trata de usar uno como otro su funcionamiento será ineficiente y estará acompañado de mucho chisporroteo en el conmutador. En los casos especiales en que debe convertirse un generador con motor o viceversa, esto se puede hacer ya sea desplazando el eje de escobillas y/o realambrando o reconectando los interpolos para compensar la nueva dirección de desplazamiento del plano neutro.

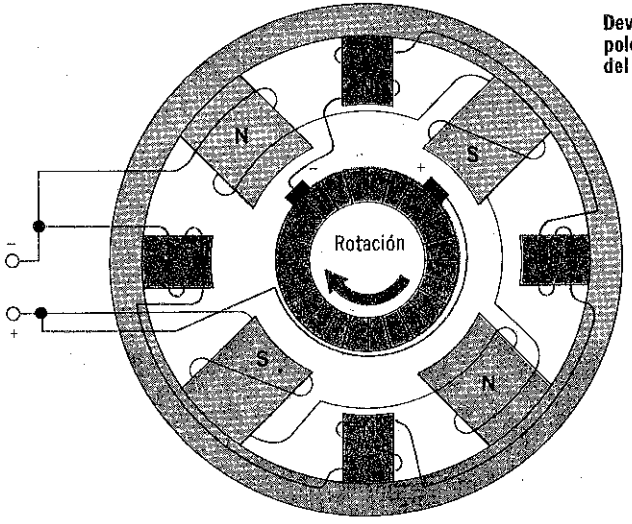


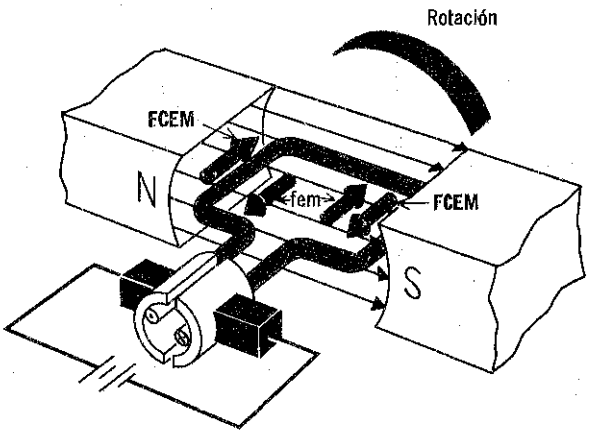
La reacción de armadura en un motor desplaza al plano neutro hacia atrás, o sea en oposición a la dirección de rotación



devanado de interpolos

En el generador las polaridades de los interpolos son opuestas a las polaridades de los interpolos en los motores. Nótese que, en ambos casos, los interpolos están conectados en serie con la armadura de manera que puedan responder a cambios en la reacción de armadura, a diferentes velocidades.





Cuando se usa un motor como generador, la regla de la mano izquierda para generadores establece que el flujo de la corriente en la armadura es el inverso del flujo de corriente en el motor para la misma dirección de rotación. Esto significa que la fem inducida en la armadura de un motor que opera por acción generadora se opone a la fem aplicada a la armadura del motor. Por esta razón, recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz o fcem.

fuerza contraelectromotriz

La *acción de generador* siempre tiene lugar en un *motor en operación*. Al girar la armadura del motor, sus espiras conductoras cortan líneas de flujo magnético del campo. Estas son las condiciones necesarias para que haya inducción electromagnética. Por lo tanto, siempre se inducirá una fem en la armadura giratoria del motor durante operación normal del motor.

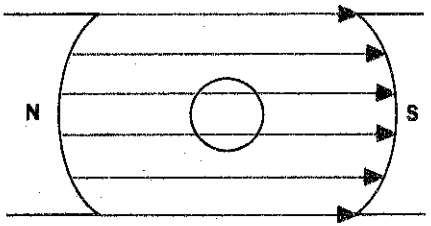
Para comprender los efectos de esta fem inducida se volverá a considerar al motor elemental de c-c de una espira. La corriente para poner en marcha la armadura fluye en la dirección determinada por la fem aplicada. Una vez iniciada la rotación, el conductor en movimiento corta líneas de flujo. Si se aplica la regla de la mano izquierda para generadores, la fem inducida produce una corriente en dirección opuesta. Así pues, la fem inducida en la armadura de un motor debida a su rotación en el campo *se opone* al voltaje de línea aplicado al motor. Esto concuerda con el enunciado que se deriva de la ley de Lenz, la cual se ha estudiado en el volumen 3. La corriente producida por una fem inducida tiene una dirección tal que se opone al movimiento del conductor que produce la fem inducida.

La fem inducida como resultado del funcionamiento normal del motor recibe el nombre de *fuerza contraelectromotriz* o fcem. La fem efectiva que hay en un circuito de armadura siempre es igual al voltaje aplicado menos la fcem.

$$\text{fem}_{\text{efectiva}} = \text{fem}_{\text{aplicada}} - \text{fcem}$$

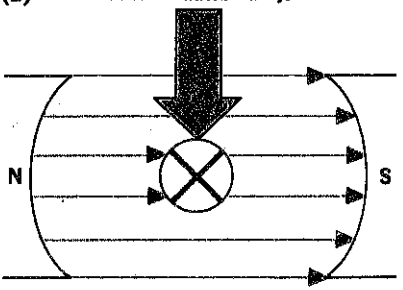
Para producir una corriente de armadura que haga funcionar un motor, el voltaje aplicado al circuito de armadura debe ser mayor que la fcem que se producirá una vez que el motor inicie su rotación. La cantidad de fcem producida en un motor es siempre proporcional a la intensidad de flujo del campo y velocidad de rotación de la armadura (la cantidad de flujo y rapidez con la que se cortan las líneas de flujo).

(A)



Conductor al reposo en un campo estacionario

(B) Fuerza hacia abajo

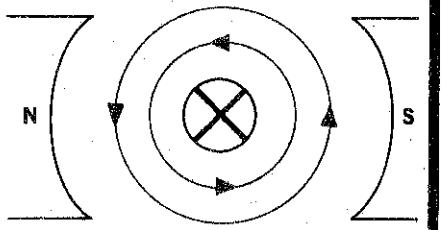


Al empujar el conductor hacia abajo, a través del campo, se induce un voltaje en el conductor, por inducción electromagnética

repaso de la ley de lenz

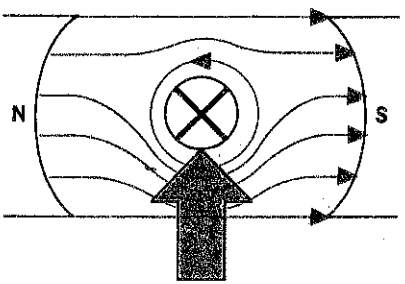
Siempre que se mueve a un conductor dentro de un campo magnético, la corriente inducida en el conductor establece un campo alrededor del mismo; dicho campo tiende a mover al conductor contra la dirección inicial del movimiento. Dicho de otra manera, la ley de Lenz dice que se produce una acción motor como resultado del funcionamiento normal del generador y viceversa.

(C)



La inducción de un voltaje hace que el flujo de corriente en el conductor (hacia la página) y un campo magnético se establece alrededor del conductor, según se indica (regla de la mano izquierda)

(D)



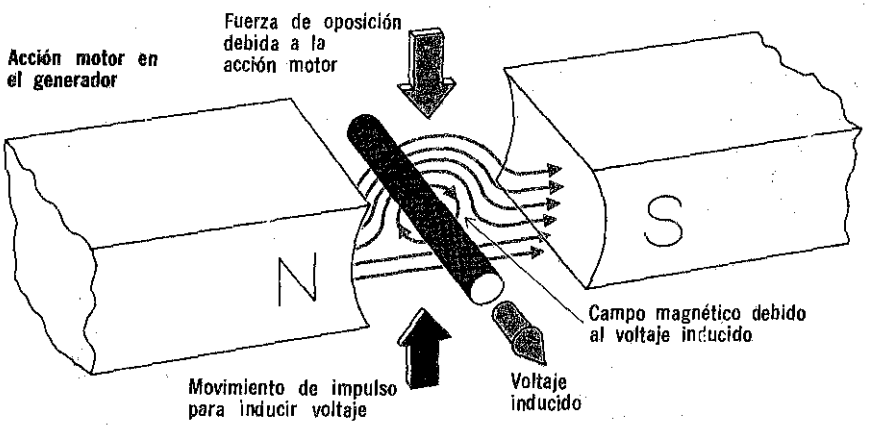
Reacción hacia arriba del conductor

Ahora se han creado las condiciones para la acción básica del motor. Debido a la concentración de líneas de flujo abajo del conductor, éstas tienden a apartarse y al hacerlo empujan al conductor hacia arriba

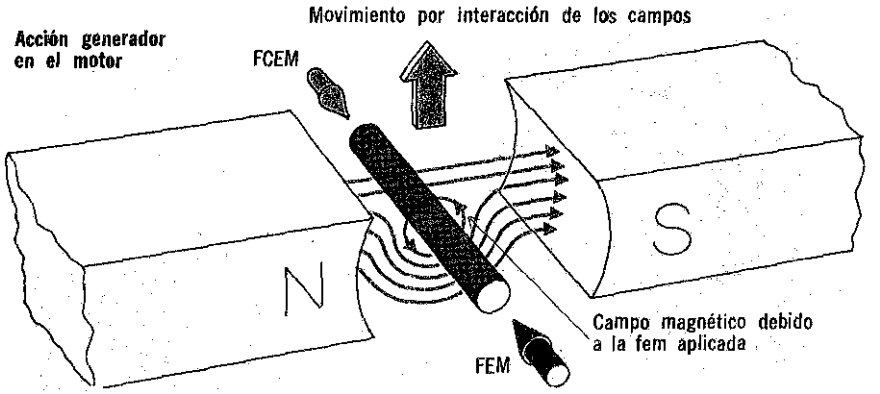
fcem y contrapar

La acción generador en el motor, que produce *fuerza contraelectromotriz* o fcem es comparable a la acción motor en el generador, la cual produce *contrapar.*

El movimiento impulsor inicial que se imparte a la armadura *del generador,* empuja a un conductor a través del campo magnético de las piezas polares y, en consecuencia, induce un voltaje en el conductor. Sin embargo, este voltaje establece un campo magnético alrededor del conductor y la interacción entre éste y el de las piezas polares origina una fuerza que se opone al movimiento impulsor inicial. Esta fuerza se conoce como *contrapar.*



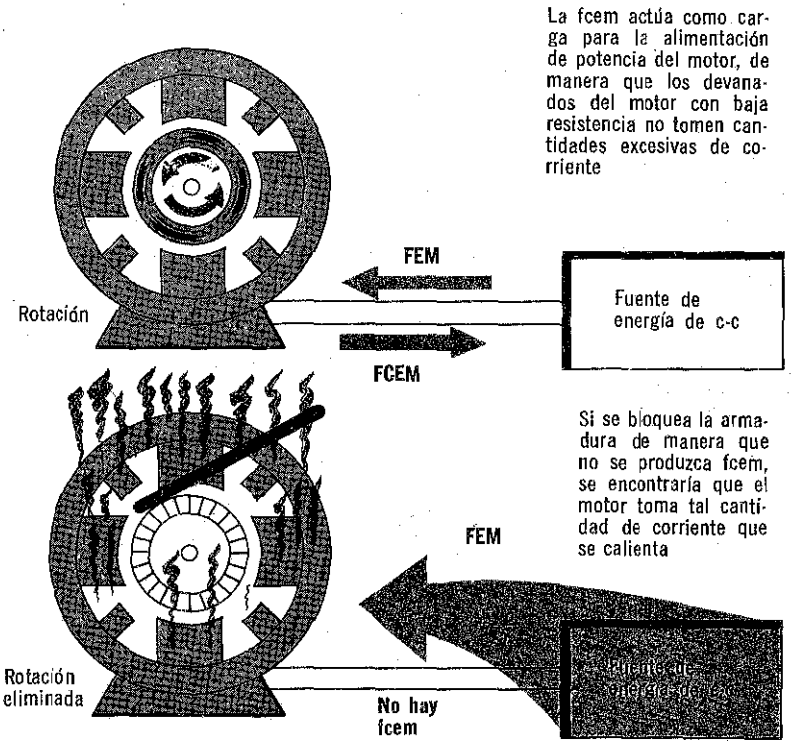
En el *motor,* la fem inicial impartida al conductor establece un campo magnético a su alrededor, el cual interactúa con el de las piezas polares, haciendo que el conductor se mueva. Este movimiento a través del campo induce un voltaje en el conductor, la fcem se opone a la fem original.



efectos de la fcem

Como el devanado de armadura de un motor es de cobre, la resistencia de la armadura es muy pequeña. De hecho, frecuentemente es inferior a 1 ohm. La aplicación de cualquier voltaje a una armadura en reposo con resistencia de 1 ohm hace que fluya una elevada corriente de corto circuito a través de él. Si la armadura estuviese bloqueada de tal manera que le fuese imposible girar, se calentaría y probablemente se quemaría debido a la corriente. Sin embargo, recuérdese que la armadura puede girar libremente. Cuando se aplica la corriente, la armadura empieza a girar, corta líneas de fuerza y se origina una fcem inducida. Como la fcem se opone al voltaje que recibe el motor, es tal que reduce la corriente de corto circuito que podría aplicar el voltaje tomado de la línea a través de la armadura de baja resistencia.

En consecuencia, la fem sirve de limitador automático de corriente, el cual reduce la corriente de armadura hasta un nivel adecuado para impulsar al motor, pero no es tan grande que llegue a calentar la armadura hasta el punto en que corra peligro de quemarse. Así, la energía suministrada a la armadura hace las veces de una verdadera carga eléctrica, en lugar del corto circuito, de manera que el motor recibe la potencia útil que necesita para funcionar.

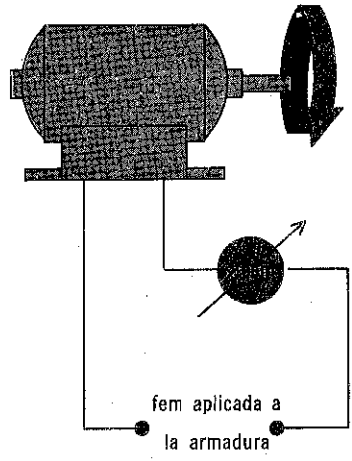


fcem y la velocidad del motor

Se ha explicado que la *velocidad* de funcionamiento del motor eléctrico la determina el par producido por el motor, y la *carga* que tiene que impulsar al motor. El par es la fuerza que se produce cuando las líneas de flujo magnético del campo y de la armadura interactúan; depende de la intensidad del campo y la intensidad del flujo de armadura. Suponiendo que en un motor no hay carga externa, ni un campo constante, aumentando la corriente de armadura, el flujo de armadura aumenta su intensidad, se produce un par mayor y se incrementa la velocidad del motor.

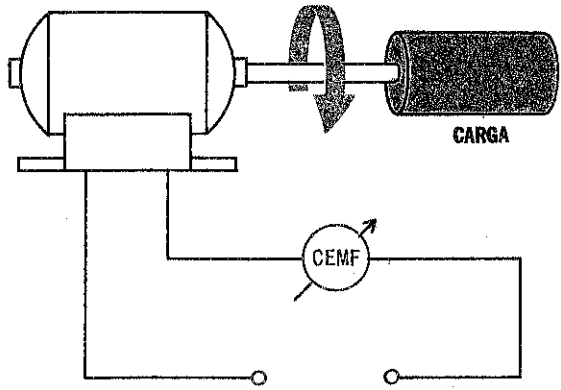
Asimismo, como ya se explicó, cuando la velocidad del motor aumenta, la armadura corta a más velocidad las líneas de flujo del campo. Como resultado en la armadura se produce una fcem mayor. Esto significa que, cada vez que aumenta la corriente de armadura para acelerar un motor, el aumento correspondiente de la fcem se comporta de tal manera que reduce el aumento original en la corriente de armadura. Por lo tanto, la velocidad final que alcanza el motor en este caso no suele ser mucho mayor que la velocidad inicial. Este tipo de efectos que produce la fcem proporciona a los motores eléctricos un sistema integrado para regular su propia velocidad.

Cuando un motor gira demasiado aprisa, se genera una mayor fcem para disminuir la fem que llega al motor. Esto reduce la velocidad del motor a la normal. También es cierto lo inverso, de manera que la fcem tiende a regular la velocidad del motor



Por lo tanto, el motor de c-c generalmente funciona a una velocidad normal en la cual la suma de la caída de voltaje en la armadura es exactamente igual al voltaje tomado de la línea, debido al efecto de su resistencia más la fcem producida. Una vez alcanzada esta velocidad, el motor de c-c tiende a regular su funcionamiento a dicha velocidad. Esto lo hace ajustando el valor de la fcem producida, a fin de cambiar la corriente de armadura a la cual el par final producido es precisamente suficiente para mantener la velocidad natural de funcionamiento.

Cuando se aplica una carga al motor, éste tiende a hacer más lenta su marcha. Pero esto reduce a la fcem, lo que aumenta la fem alimentada al motor para llevarlo nuevamente a la velocidad correcta



Mientras mayor sea la carga

Menor será la velocidad

Menor la fcem

Y mayor la fem para elevar la velocidad

El opuesto es cierto cuando es retirada la carga del motor. El motor tiende a ganar velocidad, pero la fcem aumenta para reducir la fem alimentada al motor para hacer más lenta su marcha y volver a tomar la velocidad correcta

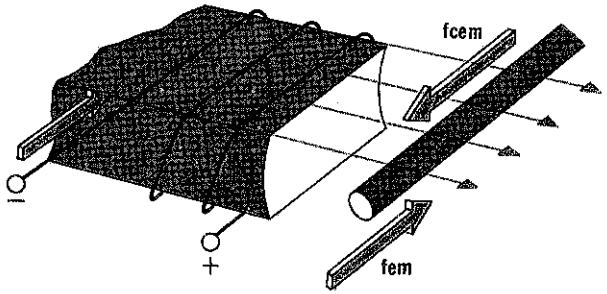
carga y la velocidad de un motor

Si a un motor que funciona a su velocidad normal sin carga, súbitamente se le aplica una carga, el efecto inmediato de ésta siempre será reducir la velocidad del motor, lo cual a su vez reduce la rapidez con que la armadura corta las líneas de flujo del campo y, como resultado, se reduce la fcem. Esta caída de la fcem permite a la armadura tomar más corriente de la fuente de energía. Con la corriente adicional de armadura se produce un aumento en el par y otro aumento correspondiente en la velocidad del motor. Generalmente, la velocidad del motor aumenta para cubrir los requisitos de la carga. Naturalmente, al aumentar la velocidad, también aumenta la fcem y el motor tiende nuevamente a regular su propia velocidad. A la larga, el motor se estabiliza a una velocidad de operación de acuerdo con los requisitos de la carga que se le aplica.

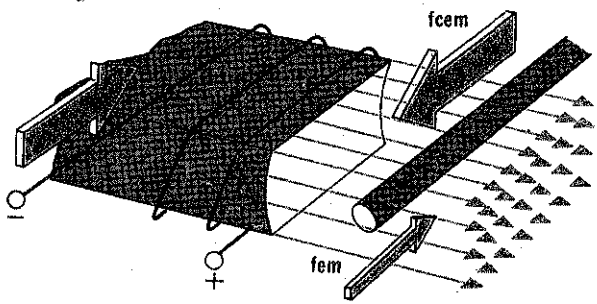
Estas relaciones existentes entre la carga aplicada a un motor y la correspondiente velocidad de funcionamiento del motor constituyen un factor importante en el diseño del motor y su aplicación, llamada la *característica carga-velocidad.*

intensidad de campo y la velocidad de un motor

Se ha explicado que, en general, el aumento de la corriente de armadura hace que también aumente el flujo de armadura, lo cual produce un par mayor y acelera al motor. Sin embargo, el aumento de la intensidad del campo tiene el efecto precisamente opuesto. Cuando se incrementa la intensidad del campo, aparece un mayor número de líneas de flujo en la trayectoria de la armadura giratoria, la acción generador es mayor y la fcem inducida aumenta. Suponiendo que exista una carga constante en el motor, la corriente de armadura se reducirá y el motor funcionará más lentamente. En este punto, tiene lugar cierta regulación de velocidad ya que también la fcem disminuye, de modo que es posible que fluya alguna corriente adicional de armadura. Este nuevo valor de la corriente de armadura siempre es ligeramente inferior al valor inicial. Por lo tanto, la velocidad del motor es algo menor que antes de aumentar la intensidad del campo.



La fcem se produce cuando la armadura corta a través de las líneas de flujo de las piezas polares



Cuando se aumenta la intensidad del campo, hay más líneas de flujo y la fcem aumenta

Siguiendo el mismo razonamiento, si se reduce la intensidad del campo de un motor, también se disminuirá el valor de la fcem inducida, haciendo que fluya mayor corriente en la armadura y acelerando el motor. Nuevamente, suponiendo que existe una carga constante, al aumentar la velocidad del motor, la fcem inducida aumenta y la corriente de armadura alcanza un valor que es lo suficientemente grande para mover la carga. Sin embargo, como la carga ahora es impulsada a mayor velocidad, requiere más potencia y el valor de la corriente de armadura es también mayor que antes.

resumen

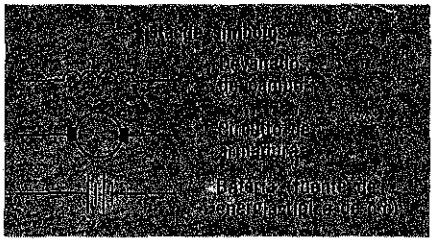
☐ Los motores y los generadores son mecánica y eléctricamente similares. Sin embargo, como son aparatos que funcionan en principios opuestos, algunas de sus características son opuestas, lo cual impide que pueda usarse uno como el otro. ☐ Para motores se usa la regla de mano derecha, en cambio, para generadores se usa la regla de la mano izquierda. ☐ La reacción de armadura en el motor desplaza el plano neutro hacia atrás; en tanto que, en el generador, lo desplaza hacia adelante. Por lo tanto, la posición de escobillas y la conexión de interpolos del motor son opuestas a las del generador.

☐ Debido a que los devanados de los motores pasan por un campo magnético, éstos siempre funcionan como generador, produciendo una fcem. Esta fcem se opone al voltaje que se le aplica al motor y, así, reduce la corriente de armadura. ☐ Como la fcem es proporcional a la velocidad de la armadura, sirve para regular la velocidad del motor. Cada vez que la armadura se acelera, tiende a regular la velocidad del motor, y siempre que la armadura se acelera, se produce una fcem mayor, la cual reduce la corriente de armadura, retardando la rotación de la armadura. ☐ Cuando se aplica súbitamente una carga a un motor de c-c, su armadura gira más lentamente; pero entonces la fcem disminuye, haciendo que aumenten la corriente de armadura y la velocidad del motor, hasta que alcancen su valor normal.

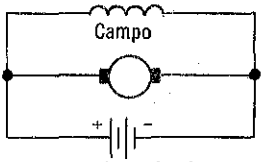
☐ Un aumento de la corriente de armadura tiende a acelerar el motor; en cambio, un aumento en la corriente de campo reducirá la velocidad del motor, ya que aumenta la fcem y ésta reduce la corriente de armadura. ☐ La fcem de un motor es comparable al contrapar que se produce en un generador.

preguntas de repaso

1. Para las dos reglas diferentes usadas en motores y generadores, si dos dedos correspondientes cualesquiera de cada mano señalan en la misma dirección, los terceros señalarán en la dirección _____.
2. Diga en qué dirección se desplaza el plano neutro de los generadores a causa de la reacción de armadura.
3. ¿Cómo influye el sentido del desplazamiento del plano neutro (respuesta a la pregunta 2) en el tipo de devanado usado en motores y generadores?
4. ¿Por qué produce un motor fcem?
5. La fcem hace posible que los devanados de armadura tengan una resistencia _____.
6. ¿Por qué un aumento en la tensión aplicada a la armadura tiene poco efecto en la velocidad del motor?
7. ¿Cómo contrarresta la fcem los cambios de carga?
8. ¿Qué ley describe a la fcem? Enúnciela.
9. ¿Qué puede hacerse para cambiar la velocidad de un motor de c-c?
10. ¿Qué describe la característica carga-velocidad de un motor?



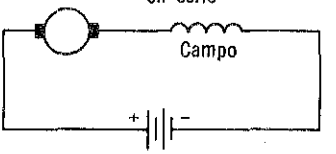
Las representaciones de diagramas esquemáticos son útiles para visualizar y obtener una mejor comprensión de las disposiciones de alambrado de circuito de varias clases de motores de c-c



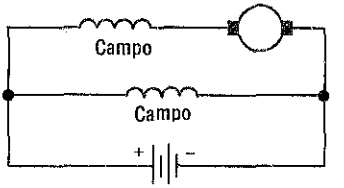
Motor de derivación

Elemento de potencia y motores, en paralelo

Elementos de potencia y motores, en serie



Motor de serie



Elemento de potencia y motor en combinación serie pararelo

Motor combinado

clasificación de los motores de c-c

Los motores de c-c han sido clasificados eléctricamente según la forma en que sus devanados de campo están conectados a la fuente de energía eléctrica que los impulsa. Los nombres descriptivos *de derivación, de serie* y *compound,* identifican los tres tipos principales de motores de c-c. En el motor en derivación, el devanado de campo y el de armadura se conectan en paralelo al circuito de entrada. En el motor tipo serie, el devanado de campo y el de armadura están conectados en serie con el circuito de entrada.

Como su nombre lo indica, en el motor de tipo combinado las conexiones en serie y derivado del devanado de campo y la armadura, se combinan en una sola máquina.

Los motores de c-c se clasifican mecánicamente, según el tipo de cubierta que tienen y según la llamada característica carga-velocidad.

Las cubiertas de los motores son de los siguientes tipos: abierto, semicerrado, a prueba de goteo, a prueba de agua, sumergible y a prueba de explosión.

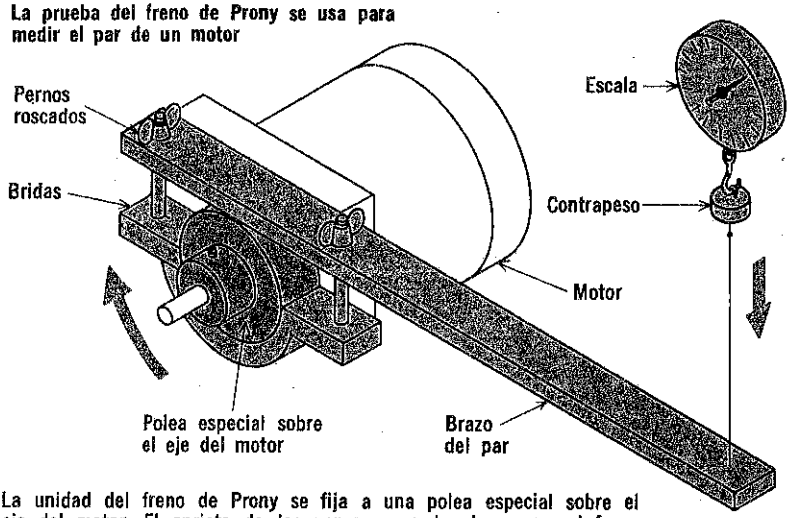
Según sus características de carga-velocidad los motores se clasifican en motores de velocidad constante, velocidades múltiples, velocidad ajustable, velocidad variable y de velocidad variable ajustable.

potencia nominal de los motores

Los motores se clasifican según la carga que pueden impulsar y a lo cual se le llama *salida de potencia.* También se clasifican por la potencia eléctrica que toman de la línea, llamada la *entrada de potencia,* y por la calidad con que transforman energía eléctrica en energía mecánica, a lo que se llama *eficiencia.*

La salida de potencia es una medida de la energía mecánica que el motor transmite a plena carga y se indica en *caballos de fuerza.* El caballaje es una forma de indicar la cantidad de trabajo que puede efectuar un motor en determinado periodo de tiempo, en comparación con un caballo. Un caballo de fuerza equivale a 33,000 libras-pie de trabajo por minuto. La cantidad de libras-pie de trabajo que produce un motor es igual a su par multiplicado por la velocidad a que funciona. Puede calcularse el caballaje de cualquier motor si se conocen su par y su velocidad. El par se puede medir directamente por medio de un dispositivo que se llama *freno de Prony* y la velocidad se puede determinar mediante un tacómetro, o contador de revoluciones por minuto, y un reloj. Generalmente, en la placa de datos del motor se indica el caballaje nominal del mismo.

La prueba del freno de Prony se usa para medir el par de un motor



La unidad del freno de Prony se fija a una polea especial sobre el eje del motor. El apriete de los pernos roscados hace que el freno gire junto con el motor. Sin embargo, el brazo del freno está limitado por la escala de un resorte. El par es el producto de lo que se lee en la escala (fuerza en kilogramos) por la longitud del brazo de par, en metros

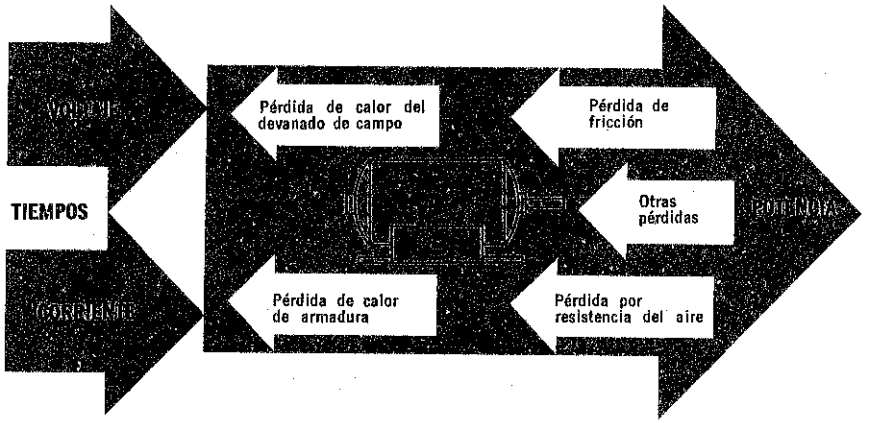
La potencia eléctrica que toma un motor de c-c de la línea de alimentación es simplemente el producto de la corriente por el voltaje, y se expresa en watts.

$$\text{Potencia} = \text{voltaje} \times \text{corriente}$$

$$P_{watts} = E_{volts} \times I_{amps}$$

potencia nominal de los motores

Desgraciadamente, no toda la potencia que llega a un motor es recuperada como potencia mecánica útil para impulsar la carga. Parte de la potencia se consume como calor en el devanado de campo; otra parte se consume en forma de calor en la armadura; y otra parte se utiliza para vencer los efectos de carga mecánica debidos a la fricción, la resistencia del aire, etc. En todos estos casos, se consume una cantidad de potencia que no se transfiere a la carga como energía mecánica. Esta potencia perdida recibe el nombre de *pérdidas*. La *salida* de potencia de un motor siempre es *igual* a su *entrada* de potencia *menos* todas las *pérdidas de potencia.*



La eficiencia de un motor es una medida de la transformación de la entrada de potencia en salida de potencia. Si las pérdidas son bajas, se dice que la eficiencia es alta. La eficiencia se determina dividiendo la entrada de potencia entre la salida de potencia y multiplicando por 100, para obtenerla en porcentaje. La entrada, expresada en *watts,* se puede dividir entre la salida expresada en *caballos de fuerza* (hp), debido a que existe una relación definida entre ambas, que es la siguiente:

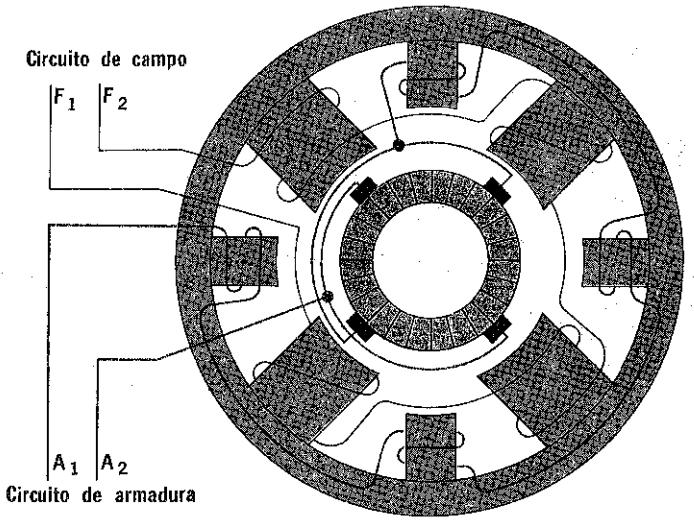
$$1 \text{ hp} = 746 \text{ watts}$$

La clasificación de la información en la placa de datos del motor generalmente suministra la información suficiente para obtener o calcular todo lo que se necesita conocer del motor.

Con frecuencia, los motores se clasifican según la entrada en caballos de fuerza De acuerdo con esta clasificación, un motor de ¼ hp, por ejemplo, tendrá una salida algo menor de ¼ hp debido a las pérdidas.

motor de derivación o shunt

El motor de derivación debe su nombre al hecho de que su devanado de campo está conectado a la línea de alimentación de potencia en paralelo con el devanado de armadura, lo cual significa que existe una trayectoria independiente para el flujo de corriente a través de cada devanado. En un motor de derivación, la corriente de campo puede mantenerse constante y el circuito de armadura sólo sirve para controlar al motor. Así, una de las principales características de este tipo de motor es el hecho de que puede mantener una velocidad constante al alimentar una carga variable y la carga puede quitarse totalmente sin peligro para el motor.



El recorrido del devanado indicará que el circuito de campo y el circuito de armadura son independientes. Por lo tanto, éste es un motor de derivación. Se notará que los polos intermedios están en serie con el circuito de armadura para hacer que respondan a cambios de corriente de armadura

Supóngase que aumenta la carga de un motor de derivación. El efecto inmediato es reducir la velocidad de armadura. La reducción de la velocidad de la armadura reduce la fcem, produciendo un aumento en la cantidad de corriente de armadura que fluye, lo cual tiene el efecto de aumentar el par para acelerar nuevamente la armadura. El fenómeno se presenta en forma inversa cuando se quita carga de un motor derivado.

control de velocidad

El motor de derivación puede funcionar a varias velocidades mediante un control *reostático* ya sea en serie con el devanado de campo, el devanado de armadura o ambos. El uso de un reóstato en serie con el devanado de campo es el método más común de variar la velocidad de un motor derivado. Esto es preferible a usar un reóstato de armadura debido a que la corriente de campo es menor que la corriente de armadura y, en consecuencia, la pérdida de potencia en el reóstato es mucho menor cuando éste está en el circuito de campo. Como resultado, se dispone de mayor cantidad de corriente para el funcionamiento real del motor.

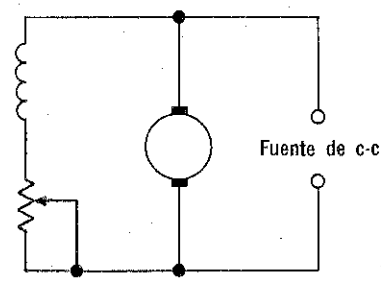
Al agregar una resistencia en serie con el campo, fluye menos corriente de campo, la intensidad de campo disminuye y el motor se acelera. Esto sucede debido a que, cuando la armadura giratoria corta menos líneas de flujo, la fcem tiende a disminuir.

Esto hace posible que fluya más corriente en la armadura, lo que ocasiona un aumento del par fuera de proporción con la cantidad requerida. Como resultado, el motor se acelera rápidamente y la fcem aumenta a un valor en el cual la corriente se reduce hasta que produce la cantidad correcta de par.

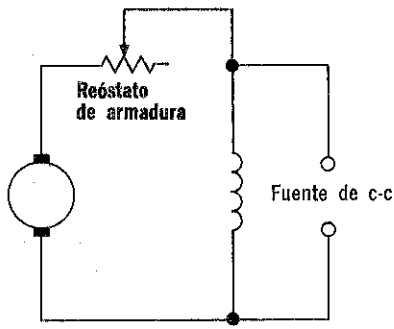
Si se agrega menos resistencia en serie con el campo, la intensidad del campo aumenta y la marcha del motor se vuelve más lenta.

Con cualquier parte del reóstato en el circuito, una porción del voltaje de alimentación se reduce en él y fluye menos corriente a través del elemento del motor que esté en serie con él

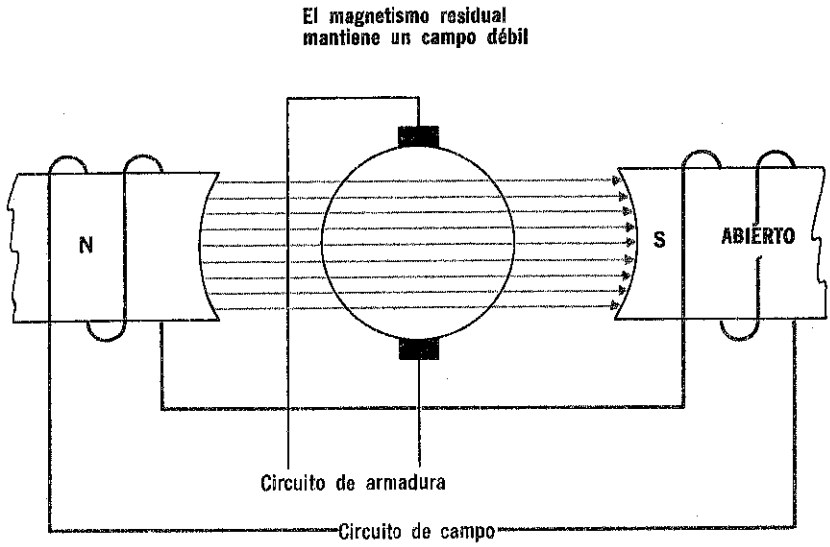
En el caso del reóstato de campo, la disminución del flujo de corriente hace que el motor aumente su velocidad



Reóstato de campo



La disminución del flujo de corriente de armadura hace más lenta la marcha del motor



Con un devanado de campo abierto, el motor de derivación tiende a desbocarse en lugar de detenerse debido a que el magnetismo residual de las piezas polares mantiene un campo débil. Naturalmente, el circuito de armadura todavía puede tomar corriente debido a que el devanado de campo y la armadura están en paralelo con respecto a la fuente de energía

sensibilidad a fluctuaciones de corriente

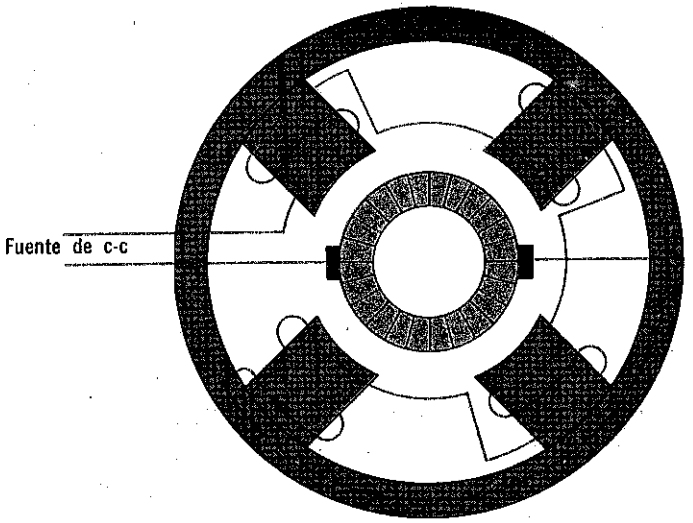
Téngase presente que una de las características notables del motor de derivación es que acelera cuando disminuye la corriente en el devanado de campo. Esta característica se aprovecha para controlar la velocidad del motor de derivación con un reóstato de campo en serie. El aumento de velocidad y la disminución en la intensidad del campo se deben a una reducción de fcem y un aumento correspondiente en la corriente de armadura. Cuando sucede esto, el aumento en corriente de armadura produce a su vez un aumento en el par fuera de toda proporción con la reducción de la intensidad del campo.

Así pues, si la intensidad de campo repentinamente se vuelve muy débil, como cuando se abre un devanado de campo y sólo el *magnetismo residual* mantiene el campo, el motor de derivación empezará a funcionar muy rápidamente, y se dice que se *desboca.* El funcionamiento desbocado puede destruir completamente al motor, que, en la mayor parte de los casos, no se ha construido para resistir el esfuerzo físico de trabajar a esta velocidad. De la misma manera, cuando el circuito de campo de un motor de derivación está completamente abierto, el motor probablemente se quemará debido a la elevada corriente de armadura que toma.

motor de serie

El motor de serie debe su nombre al hecho de que su devanado de campo está conectado en serie con la armadura, lo cual significa que fluye una corriente común a través de ambos devanados. Lo que suceda a la corriente de armadura a causa del impulso de una carga se "siente" automáticamente en el devanado de campo.

Ahora se examinará el efecto que esto tiene en el funcionamiento de un motor. Supóngase que se aumenta la carga de un motor de serie. Como se sabe, en el caso del motor de derivación, esto hace más lento el funcionamiento del motor, haciendo bajar la fcem; entonces, la armadura toma más corriente para aumentar el par, como primer paso para producir mayor velocidad y fcem. Sin embargo, en el motor de serie, esta corriente adicional de armadura también fluye en el devanado en serie del campo. Así pues, el flujo del campo aumenta y restaura la fcem, de tal manera que esto evita que el motor cobre velocidad, como ocurriría en el motor de derivación.



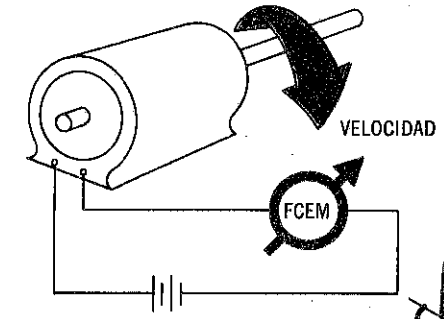
El recorrido del diagrama del devanado indicará que los devanados de campo y el circuito de la armadura están en serie; por lo tanto, éste es un motor de serie

Por lo tanto, el motor serie no funciona a velocidad constante. En el motor en derivación, cuando el par aumenta, la velocidad también aumenta y viceversa. En el motor serie, sucede lo contrario, es decir: el par y la velocidad son inversamente proporcionales. Esto significa que, cuando el par es elevado, la velocidad es baja; y cuando el par es bajo, la velocidad es alta.

sensibilidad a carga nula

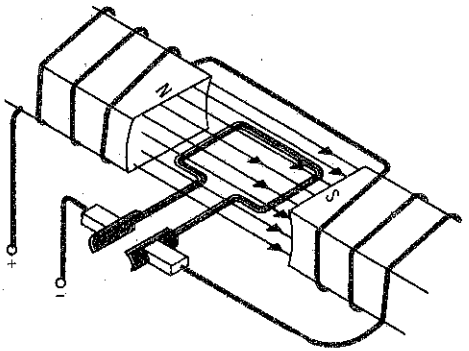
La relación carga-velocidad del motor de serie, la cual se acaba de describir, hace que el motor de serie tenga una tendencia a "desbocarse" si se le pone en marcha o se le deja funcionar sin carga. Esto se debe al hecho de que cuando el motor no tiene carga, se necesita un par muy bajo para hacer que gire la armadura. En consecuencia, la velocidad del motor de serie aumenta notablemente, tratando de producir una fcem que reduzca la corriente de armadura y mantener bajo el par.

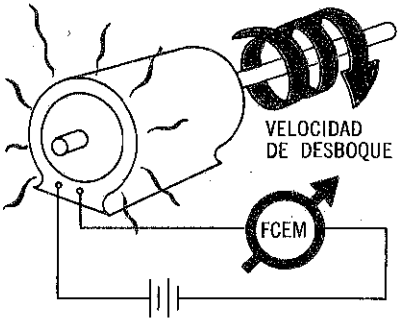
Desgraciadamente, cuando el motor funciona más rápidamente para reducir la corriente de armadura, el flujo del campo también se reduce lo mismo que la fcem. Por lo tanto, el motor funciona más de prisa y produce aún más fcem. La velocidad continúa aumentando hasta que la simple fuerza física de rotación destruya el motor, combinándose el calentamiento por fricción y la fuerza centrífuga.



Cuando un motor no tiene carga, necesita poco par y en consecuencia aumenta su velocidad para desarrollar fcem, reduciendo así la corriente de armadura y en consecuencia el par

Sin embargo, en el motor de serie, la armadura y el campo están en serie y al disminuir la corriente de armadura, también lo hace la corriente de campo y en consecuencia, el flujo

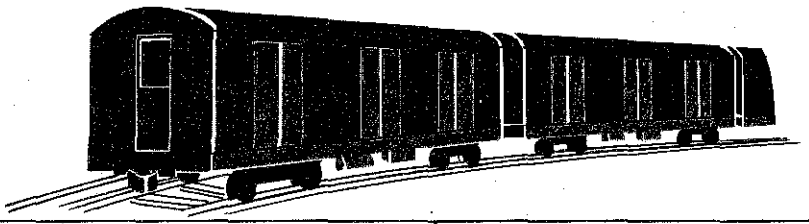


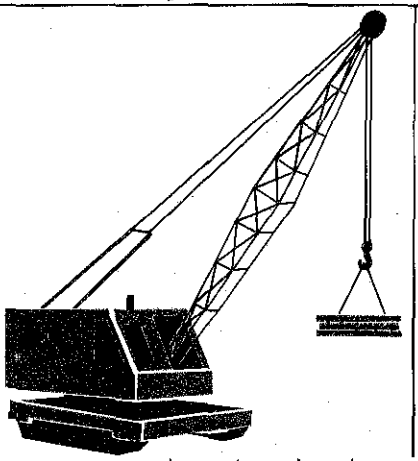


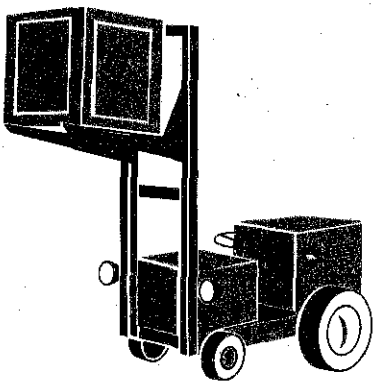
Con flujo reducido, hay una reducción de fcem y así el motor aumenta su velocidad hasta que se quema o se destruye por la fuerza centrífuga

capacidad de arranque

El motor de serie puede dar un par de arranque muy elevado y, por lo tanto, satisfacer la necesidad de tener un par grande para sobrecargas intensas súbitas. Esto se debe a que el par del motor de serie varía casi en la misma forma que el cuadrado de la corriente que pasa por él. Si la corriente de la armadura se triplicara súbitamente por una sobrecarga, la corriente que fluya en el campo y, en consecuencia, la intensidad de flujo automáticamente también se triplicaría. Como el par es el producto de la corriente de armadura por la intensidad del flujo, el par resultante sería nueve veces mayor que el original.







Los motores de serie son útiles cuando se aplican al motor cargas muy variables. En la industria, los motores de serie se usan para efectuar trabajo rudo en grúas, plumas, trenes subterráneos, locomotoras eléctricas y aplicaciones similares.

Debido a esta característica, los motores serie se usan siempre que se necesita un par de arranque alto contra cargas intensas que deben permanecer acopladas a él durante una operación completa. Los motores de serie son especialmente efectivos cuando es probable que en la operación se produzca una sobrecarga súbita muy intensa. Sin embargo, no conviene usar el motor de serie para aplicaciones en que se requiere una velocidad relativamente constante, tanto sin carga como a plena carga.

resumen

☐ Los motores de c-c se pueden clasificar de muchas maneras: por la disposición de sus devanados de campo; por sus cubiertas, o por sus características de carga-velocidad. ☐ También pueden clasificarse por entrada de potencia, por salida de potencia y por eficiencia de potencia. ☐ La potencia se puede expresar eléctricamente en watts o mecánicamente en caballos (hp).

☐ En motores de derivación, la corriente de armadura es independiente del devanado de campo en paralelo. Así pues, la fcem regula la velocidad del motor para cargas variables. ☐ Se puede usar un reóstato en serie con el devanado de campo para controlar la velocidad del motor. El aumento de resistencia reducirá la corriente del campo y aumentará la velocidad. Cero corriente de campo hará que "se desboque" el motor.

☐ En motores de serie, la misma corriente atraviesa los devanados de campo y armadura. Por lo tanto, la fcem no puede regular la velocidad del motor para cargas variables. Si una carga reduce la velocidad de la armadura, la fcem se reduce y la corriente de armadura aumenta para aumentar igualmente la corriente del campo. El aumento en la corriente del campo hace que también aumente la fcem antes de que la velocidad del motor pueda aumentar para producir más fcem. ☐ La velocidad del motor se reduce con cargas intensas y aumenta para cargas ligeras. ☐ Sin carga, el motor de serie "se desboca" ☐ El motor de serie suministra un par de arranque alto, pero tiene una característica carga-velocidad variable. ☐ Los motores combinados, reúnen las ventajas de los motores de serie y de derivación.

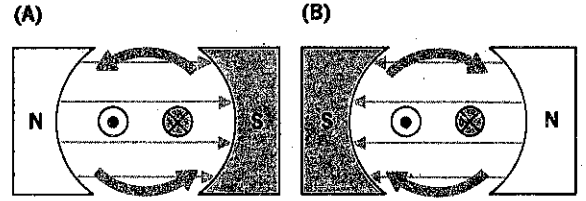
preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la diferencia que hay entre los devanados de campo de los motores de derivación y los motores de serie?
2. ¿Qué motor se debe usar para obtener una velocidad constante con cargas variables?: ¿de serie o de derivación?
3. ¿Qué motor conviene usar para obtener alto par de arranque: ¿de serie o de derivación?
4. ¿Cuántos watts produce un caballo de fuerza?
5. ¿Cuál motor es mayor: uno que tiene una entrada de 186.5 watts u otro cuya salida es de $\frac{1}{4}$ de hp?
6. Si se tiene un motor con salida de 1 hp y 75% de eficiencia ¿cuánta corriente tomaría de una línea de 110 volts?
7. ¿Cómo se transformaría un motor de derivación en motor de velocidad ajustable?
8. ¿Qué le sucede a un motor de serie cuando su devanado de campo se abre? ¿Qué le ocurre a un motor de derivación?
9. ¿Qué le sucede a un motor de derivación cuando se quita la carga? ¿Qué le ocurre a un motor de serie?
10. ¿Qué es un *motor compound*?

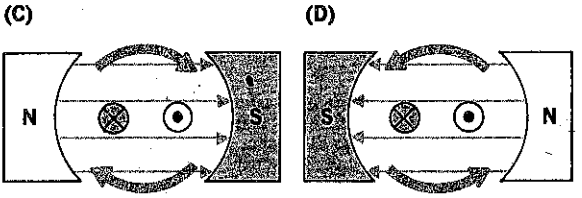
rotación en motores de c-c

Para invertir la dirección de rotación de un motor de c-c, debe invertirse *ya sea* el campo *o* la corriente de armadura, pero *no* ambos al mismo tiempo. En la figura se ilustra este principio. En (A) existen condiciones en las que se produce la rotación en sentido contrario al de las manecillas del reloj. En (B) se ha invertido sólo la corriente de campo y, ahora, el motor gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj.

En (C) se ha invertido la corriente de armadura y el motor gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj. Finalmente, en (D) están invertidas tanto la corriente de campo como la de armadura, de manera que ahora el motor girará en sentido inverso al de las manecillas del reloj.



Comenzando con la condición inicial mostrada en (A), debe invertirse o bien la polaridad del campo, como se muestra en (B), o el flujo de corriente de armadura, como se muestra en (C), para cambiar la rotación de directa (sentido de las manecillas del reloj) a indirecta (contrario)



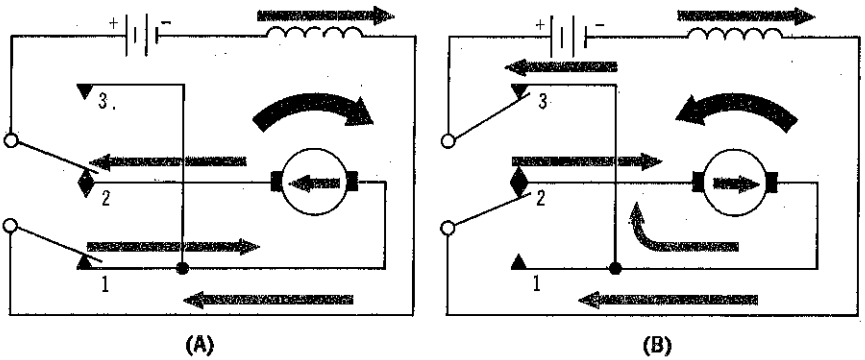
Si se invierten tanto la polaridad inicial del campo, como la corriente de armadura de (A), al mismo tiempo, como en (D), el motor continúa girando en la dirección inicial directa

Es importante comprender este principio para entender por qué cambiar la polaridad de la fuente de energía no basta para invertir la rotación de los motores de c-c prácticos. En la mayor parte de los motores prácticos el campo es producido por un electroimán y tanto el devanado de campo como la armadura son alimentados por las mismas terminales de la fuente de energía de c-c. En consecuencia, la inversión de la polaridad de la fuente de energía hace que cambien *simultáneamente* la dirección de la corriente *tanto* en la armadura *como* en el campo. Así pues, el motor continúa girando en la dirección que tenía originalmente. Según se explicará posteriormente, para invertir la rotación de un motor práctico, debe usarse un interruptor de inversión que cambia la dirección de la corriente, ya sea en el circuito de armadura o en el de campo, pero no en ambos.

rotación en el motor de serie

El elemento más importante para invertir la dirección en un motor de serie de c-c, es un interruptor del tipo llamado de dos polos, doble tiro; es importante porque con él pueden cambiar simultáneamente dos conductores en uno de los dos circuitos.

El diagrama ilustra lo que sucede en el circuito. Primero, para comprobar que se tiene un motor de serie, se sigue el flujo de electrones en (A): del lado negativo al lado positivo de la fuente de energía. Note que la corriente atraviesa tanto el devanado de campo como el de la armadura, lo cual, a su vez, prueba que están en serie. La corriente también atraviesa el interruptor: sus dos polos están conectados con los contactos 1 y 2. Cuando la corriente sigue la dirección indicada en (A), la armadura gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj, según se muestra en la figura.

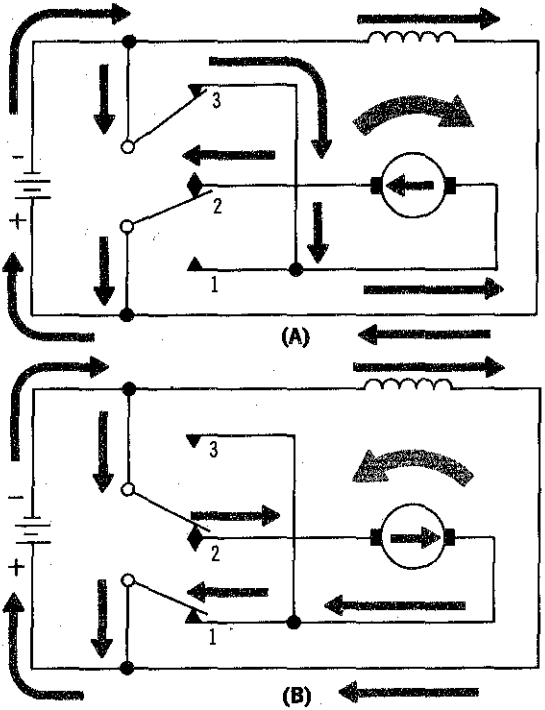


El operar el interruptor en el motor serie invirtiendo el circuito, cambia la dirección de la corriente a través de la armadura, manteniendo la misma dirección de corriente en el campo. Como resultado, la dirección de rotación del motor cambia siempre que se opera el interruptor

Ahora observe el circuito que se ilustra en (B). Primero compruebe rápidamente que el campo y la armadura siguen en serie. Ahora siga en detalle la trayectoria del flujo electrónico, note que la corriente atraviesa el devanado del campo en la misma dirección que en (A). Sin embargo, esta vez el polo del interruptor que antes hacía contacto con 1, ahora hace contacto con 2; y el polo que estaba en el contacto 2, se encuentra ahora en el contacto 3. Como resultado, al seguir más adelante la trayectoria de los electrones, se encuentra que la corriente que pasa por la armadura toma una nueva dirección, yendo hacia el lado positivo de la fuente de energía. Cuando la corriente de campo fluye en la misma dirección que en (A) y la corriente de armadura está invertida, el motor gira en dirección opuesta (contra las manecillas del reloj), como se muestra en la figura.

la rotación en el motor de derivación

La experiencia obtenida al seguir la trayectoria de un circuito puede aplicarse a los mostrados aquí. Primeramente, se traza rápidamente la trayectoria de corriente para ambos circuitos. Se empieza en el lado negativo de la batería y se siguen las flechas a través del devanado de campo y luego a través de la armadura. Cabe notar que en cada circuito hay una trayectoria paralela independiente para la corriente, de manera que se trata de un motor de derivación.



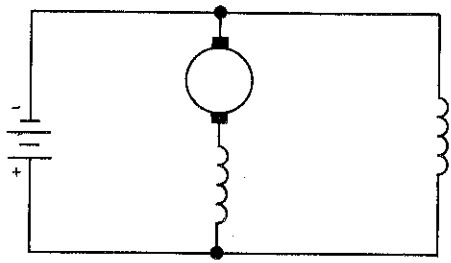
La corriente en el devanado de campo permanece invariable para la rotación del motor en cualquier dirección. El interruptor inversor cambia la dirección del flujo de corriente solamente a través de la armadura, para invertir la dirección de rotación del motor

Después se vuelve a seguir la trayectoria del circuito (A), ahora con más detalle y primero se establece la dirección de la corriente a través del campo, y luego, a través de la armadura. Nótese que el interruptor está solo en el circuito de la armadura. Cuando el interruptor hace contacto en 2 y 3, como se ilustra en (A), el motor gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj.

A continuación, se analiza el circuito (B). El interruptor está ahora en la otra posición, donde hace contacto con 1 y 2. El circuito del devanado de campo no ha cambiado y la corriente sigue atravesando el campo en la misma dirección que en (A). Sin embargo, al seguir la trayectoria de la armadura se encuentra que, debido a la nueva posición del interruptor, la corriente atraviesa la armadura en una nueva dirección. Como resultado, el motor gira en dirección opuesta (contraria a las manecillas del reloj).

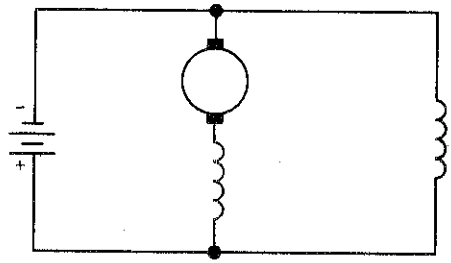
motores compound

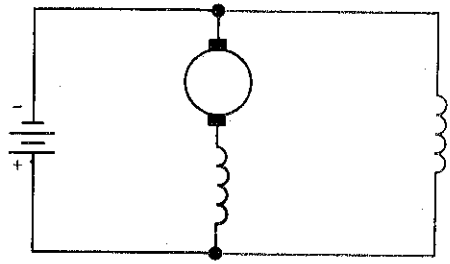
El motor de serie tiene características especiales que no tiene el de derivación y viceversa. Por ejemplo, la característica de velocidad constante del motor de derivación no se encuentra en el motor serie y la excelente característica de alto par en el motor de serie no se encuentra en el motor de derivación. Es claro que conviene combinar las mejores características de cada uno de ellos en un solo motor. Estas características se pueden combinar dando al motor dos devanados de campo: uno en serie con la armadura y el otro en paralelo con ella. A este tipo de motor de c-c se le llama *motor compound.*



Un motor compound tiene las características correspondientes tanto del motor de derivación como del motor de serie

Se puede considerar como un motor de derivación con un campo en serie adicional para dar más par al aumentar la carga





O se le puede considerar como un motor de serie con un campo en derivación adicional para dar flujo constante y tener así velocidad constante

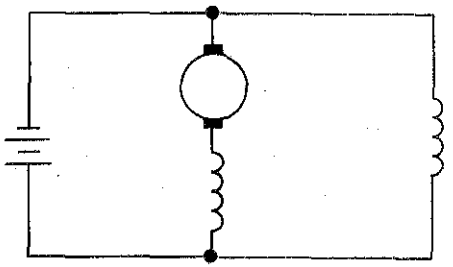
Para comprender cómo funciona un motor compound, considere un motor de derivación con un campo en serie extra. Al aumentar la carga en este tipo de motor y aminorar su velocidad, el aumento resultante en la corriente de armadura también hace que aumente la intensidad en el devanado de campo en serie. Como se obtiene mayor cantidad de flujo interactuante, el par aumenta. En consecuencia, con la combinación se han agregado algunas de las cualidades del motor de serie al de derivación.

motores compound (cont.)

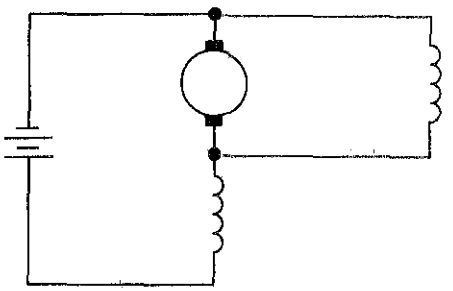
Ahora bien, considere un motor de serie al cual se le ha agregado un campo en derivación. El motor de serie común se "desboca" cuando no tiene carga, debido, en parte, a que el flujo de campo disminuye constantemente. Al agregar un campo en derivación de flujo constante, la velocidad del motor tiende a limitarse a un valor razonable, como en el caso del motor común de derivación.

Si se disponen los devanados de campo del motor compound de manera que la intensidad de uno sea mayor que la del otro, se logrará que el motor compound se asemeje más al motor de serie o al de derivación. En este control de la intensidad relativa de ambos campos se basa la clasificación de los motores compound: *compound acumulativo* y *compound diferencial.* La mayor parte de estos motores son del tipo compound acumulativo.

Si se conecta el devanado de campo en derivación con la armadura y con el devanado de campo en serie, se obtiene un *motor compound acumulativo de derivación larga.* Si el devanado de campo se conecta sólo con la armadura, entonces se tiene un *motor compound acumulativo de derivación corta.*



Conexiones de motor de derivación larga, compound acumulativo



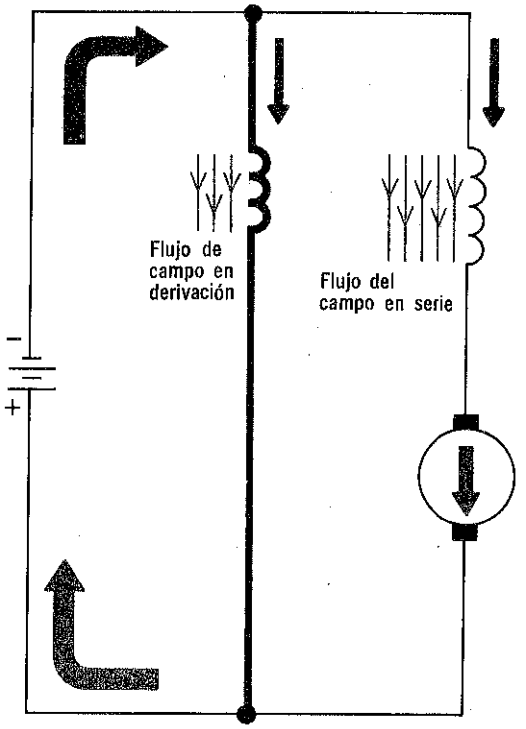
Conexiones de motor de derivación corta, compound acumulativa

La mayor parte de los motores compound prácticos que se usan actualmente son de los tipos compound acumulativo en derivación larga y corta. Rara vez se emplean motores de combinación diferencial

motores compound acumulativos

Si un motor compound tiene el devanado campo en serie y el devanado de campo en derivación en la misma dirección, *ambos* devanados influirán para generar el flujo magnético. En este caso, se tiene un *motor compound acumulativo*. La palabra *acumulativo* indica que los flujos se combinan para formar un campo total más fuerte.

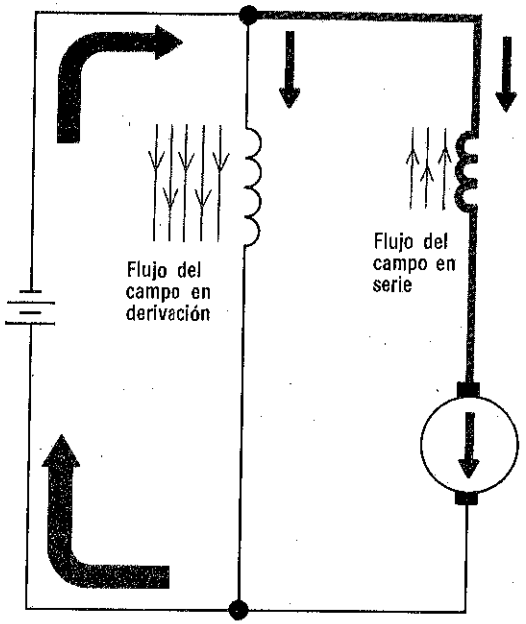
Muchos de estos motores compound acumulativos tienen sus devanados de tal manera que se da preferencia a la característica de par superior del motor de serie. Los motores de este tipo suelen ser de serie, con unas cuantas espiras derivadas para evitar que se desboquen cuando no tienen carga. A veces, a estos motores se les llama *motores de serie-derivación.*



Por otra parte, hay motores compound acumulativos en los que la característica de alto par de arranque del motor de serie, sólo sirve para poner en marcha al motor. Una vez alcanzada la velocidad normal de funcionamiento, un interruptor desconecta el devanado en serie y el motor funciona de acuerdo con las características de regulación de velocidad del motor de derivación.

motor compound diferencial

El *motor compound diferencial* es esencialmente un motor de derivación con un devanado de campo en serie. En este motor, los devanados de campo están colocados en direcciones *opuestas* de manera que la corriente en el devanado en serie *se resta* de la que fluye en la derivación. La palabra *diferencial* indica que el flujo resultante es la *diferencia* entre los dos.

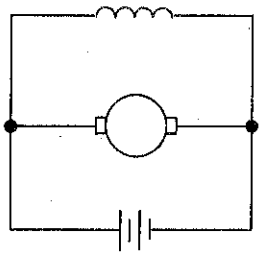
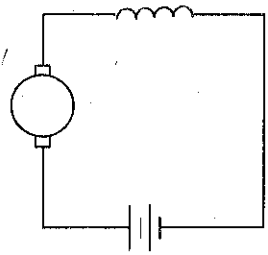
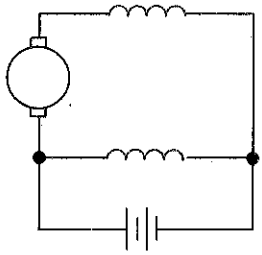
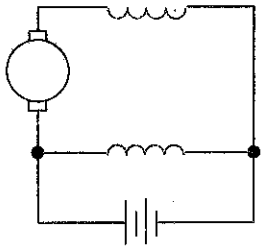


El motor compound diferencial tiene un pequeño campo en serie que produce flujo en oposición al devanado de campo en derivación principal. Esto permite que el motor funcione a velocidad prácticamente constante con variaciones en las condiciones de carga

Debido a que el campo en serie está dominado por el campo derivado, el motor compound diferencial no tiene las mismas características de par de arranque que el motor de serie típico. En este caso, el campo en serie sirve más bien para que el motor sea más sensible al cambio de carga, de manera que proporcione una mejor regulación de velocidad constante que el motor de derivación normal.

Existe una mejor regulación de velocidad constante debido a que, cuando un aumento de carga hace que el motor funcione más lentamente, además del proceso normal en el cual la disminución de la fcem hace circular mayor corriente (como un intento para acelerar el motor), también ocurre un aumento en la corriente de los devanados del campo en serie. Este aumento de la corriente en el devanado en serie se opone a la que fluye en el devanado de campo en derivación y, en consecuencia, lo reduce. Esta disminución de la intensidad del campo hace también que el motor se acelere para producir más fcem. Así resulta que el motor reacciona mucho más rápidamente para mantener su velocidad. Por lo tanto, se dice que el motor compound diferencial es más bien un regulador sensible de velocidad constante.

tabla comparativa de motores de c-c

Tipo de motor	Características	Usos
DERIVADO 	1. Buen par de arranque. 2. Buena velocidad constante. 3. Velocidad fácil de controlar. 4. Autorregulante. 5. Se desboca si se abre el campo.	Muy usado en aplicaciones industriales, donde es importante que tenga una velocidad relativamente constante.
SERIE 	1. Alto par de arranque. 2. La velocidad varía según la carga. 3. Se desboca cuando no tiene carga.	Usado en aplicaciones en que la carga siempre está conectada al motor, pero varía en rangos muy amplios.
COMPOUND ACUMULATIVO 	1. Par de arranque excelente. 2. Buena característica de velocidad constante: mejor que en el motor de derivación. 3. No se desboca cuando la carga es nula.	Usado en aplicaciones en que es conveniente que tenga un alto par de arranque, pero que no se deseen las características de "desboque" de los motores de serie.
COMPOUND DIFERENCIAL 	1. Par de arranque muy pequeño. 2. Velocidad absolutamente constante bajo cargas variables en rango reducido.	Muy pocas aplicaciones; probablemente debido a que con motores de c-a se pueden obtener características aún mejores de este tipo.

resumen

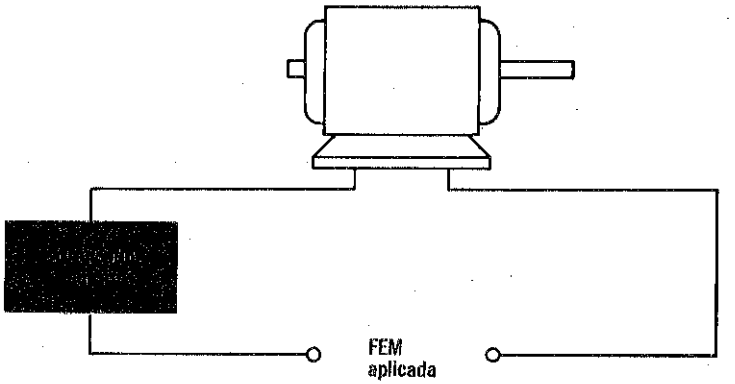
☐ La dirección de rotación en un motor de c-c puede invertirse si la corriente se invierte ya sea en el campo o en la armadura, pero no se hace en ambos. ☐ La rotación se puede invertir, tanto en los motores de serie como en los de derivación mediante un interruptor que invierta las conexiones de los conductores del campo o la armadura a la potencia aplicada.

☐ Los motores compound, disponen de campos en serie y en derivación para mejorar las características de los motores. ☐ Cuando las intensidades de las corrientes de los devanados en serie y en derivación se suman, el motor es compound acumulativo y está diseñado para dar un alto par de arranque con velocidad de regulación moderada, de manera que el motor no se desboque al funcionar sin carga. ☐ En los motores compound acumulativo se puede usar derivación larga o corta para obtener diversas características.

☐ Cuando el devanado de campo en serie anula parte de la corriente del devanado de campo en derivación, el motor se llama compound diferencial; éste trabaja como motor de derivación con poco par de arranque, pero tiene mejor regulación de velocidad. ☐ Los devanados de campo de algunos motores compound pueden conectarse de tal manera que arrancan como motores de serie con alto par de arranque y, luego, se convierten en motores de derivación para regular la velocidad.

preguntas de repaso

1. ¿Tiene buen par de arranque el motor compound diferencial?
2. ¿Qué diferencia hay entre un motor compound acumulativo de derivación larga y otro de derivación corta?
3. ¿Qué característica se busca mejorar con el diseño de un motor compound acumulativo?
4. ¿Qué efecto ocurre en la dirección de rotación de un motor de c-c si se invierte la polaridad de las conexiones de potencia al motor cuando está en operación?
5. ¿Cuál es la diferencia que existe entre los motores compound acumulativo y compound diferencial?
6. ¿Tiene mejor regulación de velocidad el motor compound acumulativo que el motor compound diferencial?
7. ¿Tiene mejor regulación de velocidad el motor compound acumulativo que el motor de derivación?
8. El motor compound diferencial es esencialmente un motor _____ _____.
9. ¿Cómo se puede invertir el sentido de la rotación en un motor de serie? ¿Cómo en un motor de derivación?
10. Los motores compound _____ también se llaman motores de serie-derivación.



Son necesarios los arrancadores para limitar la corriente de armadura que fluye cuando el motor se conecta. El arrancador se usa para llevar al motor a su velocidad normal y luego se retira del circuito. El aparato de control ajusta entonces la velocidad del motor según sea necesario

arrancadores y dispositivos de control

En el estudio de la fcem se demostró que, cuando se empieza a aplicar potencia a un motor de c-c, en la armadura fluye una cantidad de corriente casi ilimitada. En cuanto el motor comienza a funcionar, se produce la fcem y la corriente de armadura se limita a un valor razonable. Al momento del arranque, fluye una corriente muy alta y, por lo tanto, se aplica un gran esfuerzo en los devanados de armadura, en las escobillas y en el conmutador. La alta corriente puede hacer que las escobillas y el conmutador se quemen y posiblemente que el mismo devanado de armadura, se queme y abra el circuito.

Para evitar esto, se usan dispositivos especiales llamados *arrancadores de motor de c-c,* los cuales sirven para acelerar con seguridad el motor a su velocidad normal de funcionamiento. Aunque actualmente hay muchas variedades de arrancadores, éstos son básicamente alguna forma de resistencia variable o reóstato conectado en serie con la armadura.

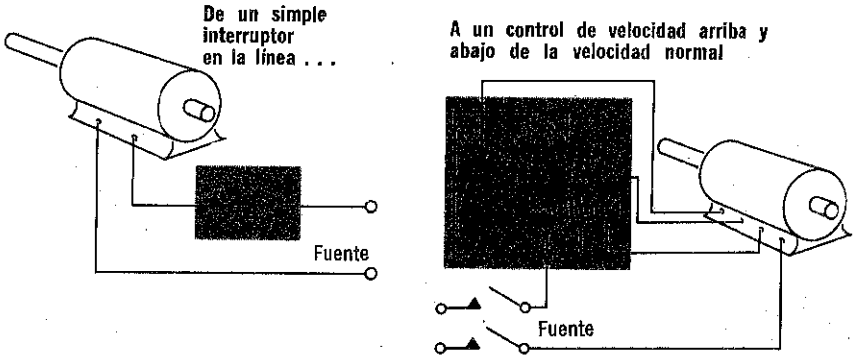
Conviene comprender que el arrancador de un motor es sólo lo que implica su nombre y que no tiene ninguna otra función cuando el motor llega a la velocidad de funcionamiento. Sin embargo, otro dispositivo, llamado *control de motor de c-c,* combina en una sola unidad física las funciones de arrancador y de control de velocidad variable; tiene un reóstato de arranque, el cual sirve para que el motor alcance su velocidad normal, y un reóstato adicional conectado, con el cual se puede variar la velocidad del motor en funcionamiento. Ya se estudió la forma en que se puede modificar la velocidad de un motor de c-c. El reóstato de control es simplemente el medio físico para realizar esta función.

Tanto los arrancadores como los controles tienen un mecanismo para desconectar automáticamente el motor de la línea de potencia en caso de que falle el voltaje de la línea de alimentación.

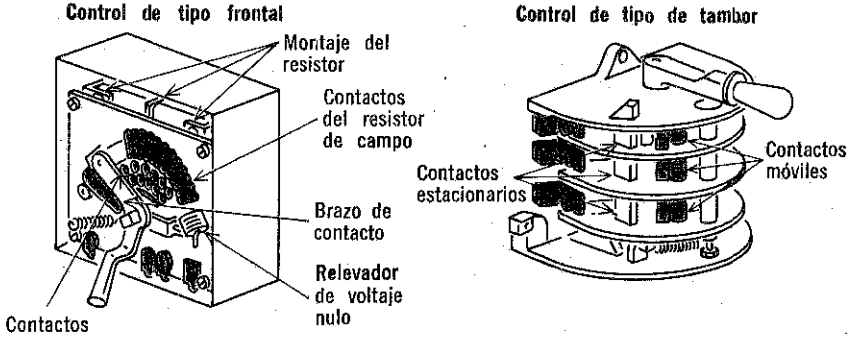
clasificación

Los arrancadores y controles se han diseñado para satisfacer las necesidades de las numerosas clases de motores de c-c. Por ejemplo, para arrancar los motores de c-c pequeños pueden disponer de un interruptor de línea relativamente sencillo en tanto que los motores de c-c grandes requieren instalaciones más complicadas.

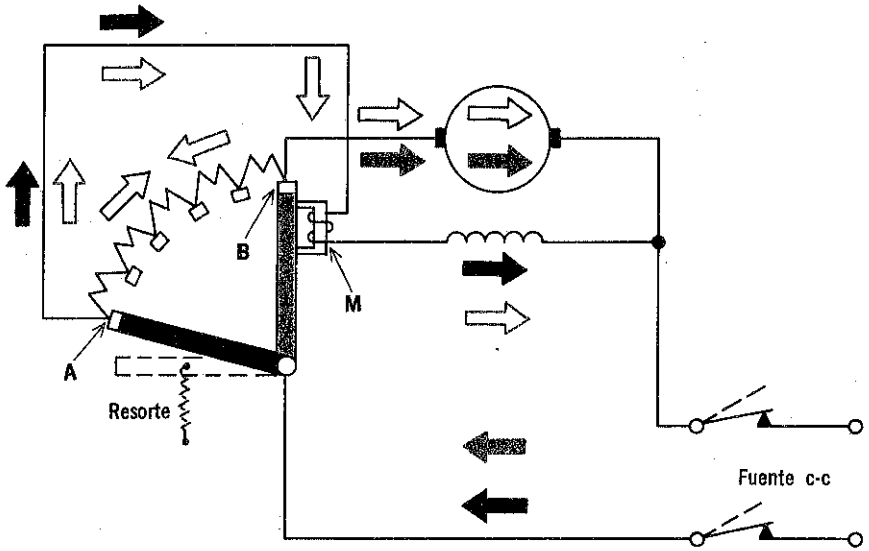
Los arrancadores y controles varían en cuanto a complejidad



Se encontrará que los arrancadores y controles se clasifican 1) por la forma en que funcionan: manual o automática; 2) por la forma en que están construidos: de placa o de tambor, y 3) por el tipo de cubierta: abierta o protegida (a prueba de goteo, a prueba de agua, etcétera). Además, los arrancadores y controles se clasifican según el número de terminales con que se conectan al motor: arrancadores de contacto doble, triple y cuádruple.



Los arrancadores y controles se pueden clasificar según su forma de construcción



El arrancador de tres puntos toma su nombre de las tres conexiones que deben efectuarse entre él y el motor al cual ha de arrancar. Nótese las diferentes distribuciones de la corriente en las diferentes posiciones del brazo

arrancadores de contacto triple para motores de derivación y compound

El arrancador de contacto triple para motores de derivación que se ilustra es *visible* y se opera manualmente. El elemento resistor del reóstato se conecta en derivación por medio de seis botones de contacto. El brazo móvil del reóstato regresa a su primera posición mediante un resorte, y está dispuesto de manera que se puede mover de un botón de contacto a otro para puentear secciones del resistor en derivación.

Después de cerrar el interruptor de línea, el operador coloca manualmente y mueve el brazo del reóstato de la posición de apagado al primer botón de contacto A. Este transmite todo el voltaje de la línea de alimentación al campo en derivación, energiza el imán de sujeción y conecta toda la resistencia de arranque en serie con la armadura. En la práctica, el valor de esta resistencia se selecciona de manera que limite la corriente de arranque a un 150% de la corriente nominal de la armadura a plena carga.

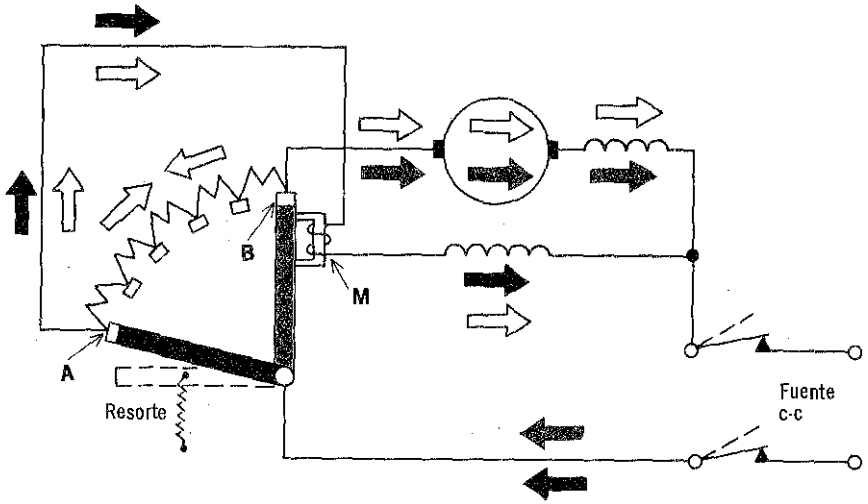
Cuando el motor comienza a ganar velocidad, el operador mueve gradualmente el brazo del reóstato hacia el contacto B, venciendo la tensión del resorte. En esta forma, la resistencia se va desconectando de la armadura y queda conectada en serie con el circuito de campo, donde prácticamente no tiene efecto, ya que su resistencia es mucho menor que la del campo y, así, no influye en la velocidad del motor ni en la intensidad del campo.

arrancadores de contacto triple para motores de derivación (cont.)

Cuando el brazo del arrancador de triple contacto está en B, la armadura queda conectada directamente a la línea de alimentación y se considera que el motor funciona a su velocidad normal. Entonces, el imán de sujeción M, fija al brazo en la posición B, oponiéndose a la tensión del resorte y no permite que el brazo del reóstato regrese a la posición de apagado. Como el imán de sujeción está en serie con el campo en derivación, detecta cualesquiera variaciones que ocurran en el devanado de campo.

En el motor de derivación, al disminuir la intensidad del campo, la armadura tiende a acelerarse. Como es posible alcanzar un punto de desboque cuando la intensidad de campo se reduce demasiado el imán de sujeción está diseñado para desenergizarse hasta determinado valor de la corriente de campo. En este punto, el brazo unido al resorte regresa automáticamente a la posición de apagado. Esta misma disposición hace que el brazo también regrese a la posición de apagado cuando el voltaje de alimentación se interrumpe por alguna razón; en este caso será necesario que el operador repita el ciclo de arranque para hacer que el motor funcione otra vez, al restaurarse la energía en la línea.

El mismo arrancador de contacto triple que tiene el motor de derivación se puede usar en un motor compound acumulativo. La ilustración muestra que la única diferencia existente entre ambas disposiciones está en el otro devanado de campo en serie del motor compound.

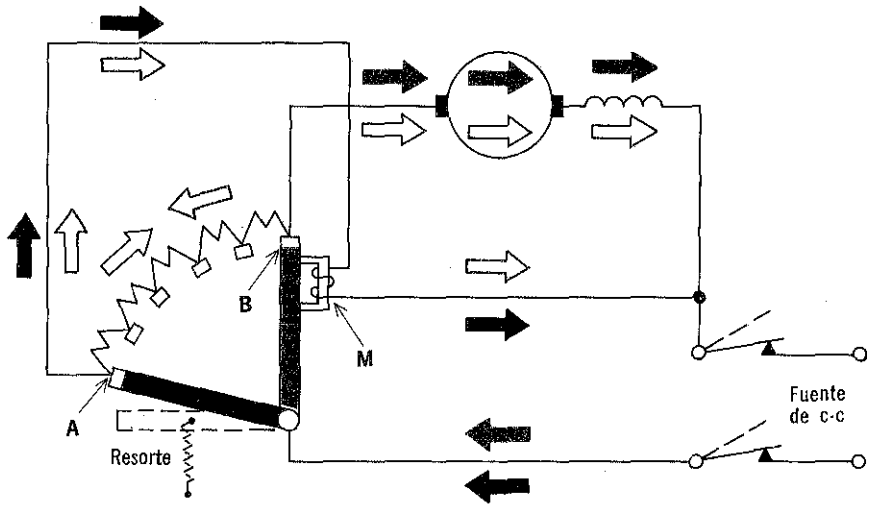


El arrancador de tres puntos para un motor compound es lo mismo que para un motor de derivación. Nótese la disposición del resorte para hacer regresar el arrancador a su posición original cada vez que el motor se pare por cualquier razón. Esta disposición obliga al operador a repetir la operación de arranque cada vez que se arranca el motor

arrancadores de contacto triple para motores en serie

El arrancador de contacto triple para motores de serie sirve para el mismo objetivo que los arrancadores que se han estudiado y que se usan en motores de derivación y compound.

Una característica del arrancador de contacto triple para motores de serie que se ilustra es que tiene *protección contra bajo voltaje,* lo cual significa que si el voltaje de la fuente desciende hasta un valor muy bajo o a cero, el motor quedará desconectado del circuito.



Aunque el arrancador de contacto triple para motor de serie requiere tres conexiones al motor y se asemeja mucho al arrancador de contacto triple para motores de derivación y compound, su estructura interna y conexiones difieren considerablemente de los otros arrancadores

Note que, en este arrancador de contacto triple, la bobina del imán de sujeción está conectada al voltaje de la fuente. Para poner en marcha al motor, el operador mueve gradualmente el brazo del reóstato de la posición de apagado a la de funcionamiento, deteniéndose en cada botón de contacto durante uno o dos segundos, hasta que se alcanza la velocidad adecuada en la posición de funcionamiento. Entonces, el electroimán de sujeción mantiene el brazo del arrancador, en la posición de funcionamiento, venciendo la tensión del resorte de retroceso.

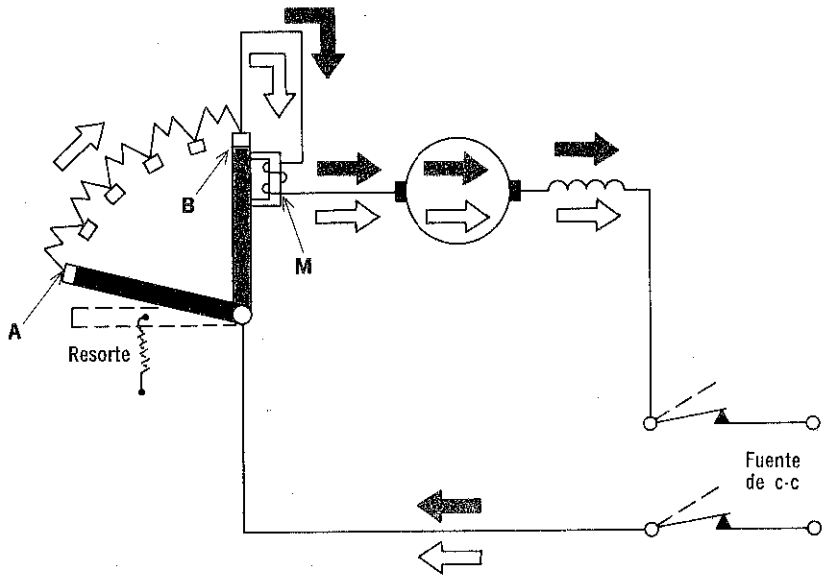
Si la tensión de la fuente baja, el imán de sujeción se desenergiza y suelta al brazo móvil, que rápidamente regresa a la posición de apagado, protegiendo así al motor de un posible daño.

arrancador de contacto doble para motores de serie

Este tipo de arrancador ofrece *protección* al motor, cuando éste funciona sin carga, lo cual significa que si se quita súbitamente la carga cuando el motor está andando, el arrancador desconectará el motor de la fuente de energía para evitar que éste se desboque.

Note que en el arrancador de contacto doble, la bobina de sujeción está conectada en serie con la fuente de alimentación, la armadura del motor y el devanado de campo. Para poner en marcha el motor, el operador mueve gradualmente el brazo del arrancador, de la posición de apagado a la de funcionamiento, deteniéndose durante uno o dos segundos en cada botón de contacto del reóstato. Finalmente el brazo se mantiene en la posición de funcionamiento, venciendo la tensión del resorte de retroceso, debido a la atracción del imán de sujeción.

Si se quita la carga del motor, la caída correspondiente en la corriente de armadura es percibida por la bobina de sujeción en serie, que la suelta. Como resultado, el brazo del reóstato queda libre y regresa a la posición de apagado por la tensión del resorte de retroceso. Esta característica evita que el motor de serie sufra daño como resultado del funcionamiento a alta velocidad, cuando tiene una carga ligera o no tiene carga.

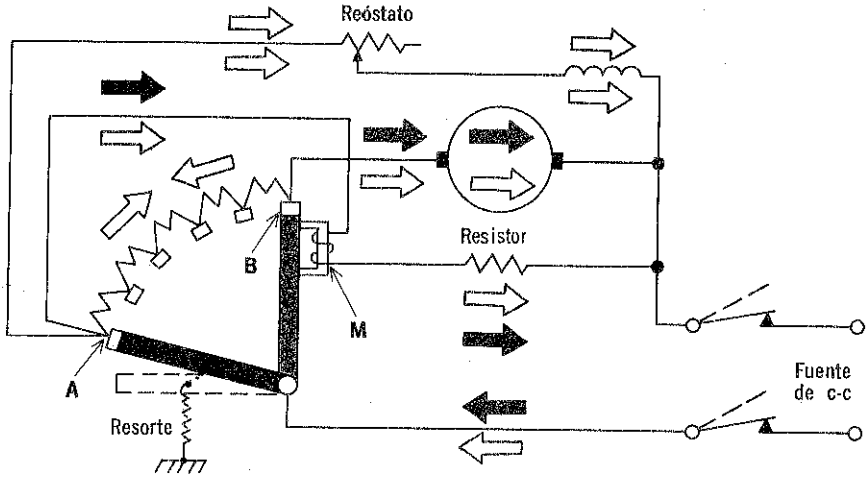


El arrancador de contacto doble contrarresta la característica de desboque sin carga del motor serie. Así pues, además de su función de arrancador, el arrancador de contacto doble sirve como monitor para detectar condiciones de carga nula. Bajo estas condiciones, el arrancador desconecta la alimentación al motor y regresa a la posición de desconectado.

de contacto cuádruple para motores de derivación y compound

Los arrancadores de contacto cuádruple para motores de derivación y compound tienen las mismas funciones básicas que los de contacto triple y, además, hacen posible que se use un reóstato de campo con los motores, para obtener velocidades superiores a la normal.

En la figura se ilustra un arrancador de contacto cuádruple usado en un motor de derivación. La bobina de sujeción no está conectada en serie con el campo en derivación, como ocurría en el arrancador de contacto triple. En cambio, la bobina de sujeción y un resistor en serie están conectados directamente con el voltaje de la fuente. De esta manera, la corriente de la bobina de sujeción es independiente de la corriente de campo, la cual se hace variar para modificar la velocidad del motor. Sin embargo, todavía se puede usar la bobina de sujeción para liberar el brazo del arrancador cuando el voltaje es bajo o nulo en la fuente.



El arrancador de contacto cuádruple es esencialmente igual que el de contacto triple descrito previamente. En el circuito se muestra un reóstato en serie separado. Puesto que el reóstato está aquí separado, el dispositivo de arranque es un verdadero arrancador y no un control

El arrancador de contacto triple sirve para poner en marcha el motor de la misma manera que la descrita para el arrancador de contacto triple. En cuanto el brazo del reóstato llega a la posición de funcionamiento, el reóstato de campo conectado en serie con el campo en derivación se usa para graduar la velocidad del motor al valor deseado. Cuando debe detener el motor, generalmente el operador reajusta el reóstato de campo de manera que toda la resistencia se interrumpa y la velocidad del motor se reduzca a su valor normal, lo cual asegura que la siguiente vez que el motor se ponga en marcha se dispondrá de un campo intenso y en consecuencia, del máximo par.

resumen

☐ La resistencia a la c-c de las bobinas de armadura es muy baja. Así pues, cuando se empieza a energizar un motor, la armadura toma una corriente muy elevada, hasta que la velocidad de la armadura se vuelve lo suficientemente grande para producir suficiente fcem y limitar la corriente. ☐ Para proteger el motor contra estas altas corrientes dañinas, se usan arrancadores y controles, con las cuales se limita la corriente a un valor seguro hasta que el motor alcanza su velocidad normal.

☐ El arrancador de contacto triple que se usa en los motores de derivación y los compound acumulativo se ajusta primero para no aplicar resistencia en serie con el campo y tener la resistencia máxima en serie con la armadura. ☐ Al cobrar velocidad la armadura, se mueve el brazo del arrancador a las secciones de un resistor con derivaciones para reducir lentamente la resistencia en serie con la armadura y aumentar la resistencia en serie con el campo, hasta que, finalmente, toda la resistencia se retira del circuito de la armadura y se transfiere al de campo. ☐ La corriente de campo a través de un imán de sujeción mantiene el brazo del arrancador en la posición de operación. Si la corriente de campo disminuye demasiado, el imán liberará el brazo para parar el motor y evitar que se desboque.

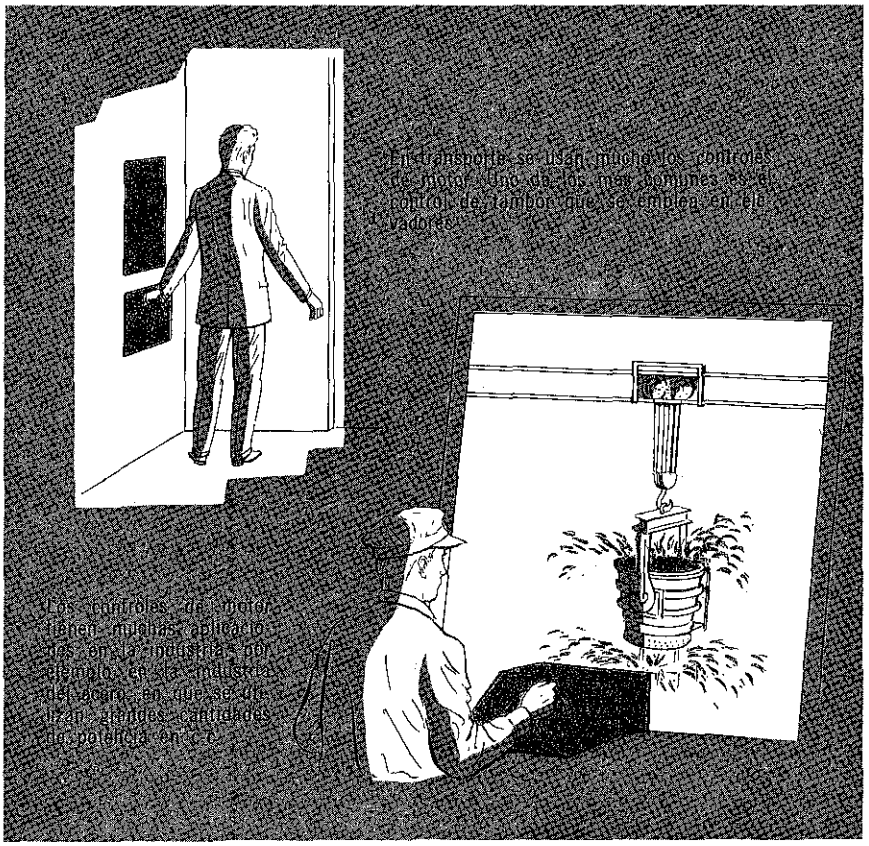
☐ El arrancador de tres puntos para motores en serie trabaja de una manera similar a la de un motor derivado o combinado acumulativo, excepto que el imán de sujeción es energizado directamente por la tensión de la línea. ☐ En un arrancador de dos puntos para motores en serie, el imán de sujeción está en serie con la armadura y el campo de manera que puede percibir cuándo la corriente del motor se reduce al retirarse la carga. ☐ El imán soltará al brazo para parar el motor y evitar que se desboque. ☐ Los arrancadores de cuatro puntos se pueden usar en motores derivadas y combinados para obtener las características adicionales de control de velocidad.

preguntas de repaso

1. ¿Por qué es necesario un arrancador de motor?
2. ¿Qué usan todos los arrancadores para controlar la corriente del motor?
3. ¿Qué significan los puntos en un arrancador de dos, tres o cuatro puntos?
4. Generalmente, ¿a qué porcentaje de corriente nominal a plena carga limita el arrancador de tres puntos la corriente de arranque?
5. ¿Cómo evita el arrancador de tres puntos que se desboque un motor derivado?
6. ¿Por qué se conecta en forma diferente el imán de sujeción de un arrancador de tres puntos en el caso de motores en serie y motores derivados?
7. ¿Qué clase de protección ofrece el imán de sujeción en un arrancador de tres puntos a los motores serie?
8. ¿Cuál arrancador ofrece protección contra desboque a un motor en serie?
9. ¿De qué manera difiere un arrancador de cuatro puntos del arrancador de tres puntos en motores derivados?
10. ¿Mueve generalmente el operador el brazo del arrancador con un movimiento suave y continuo? ¿Por qué?

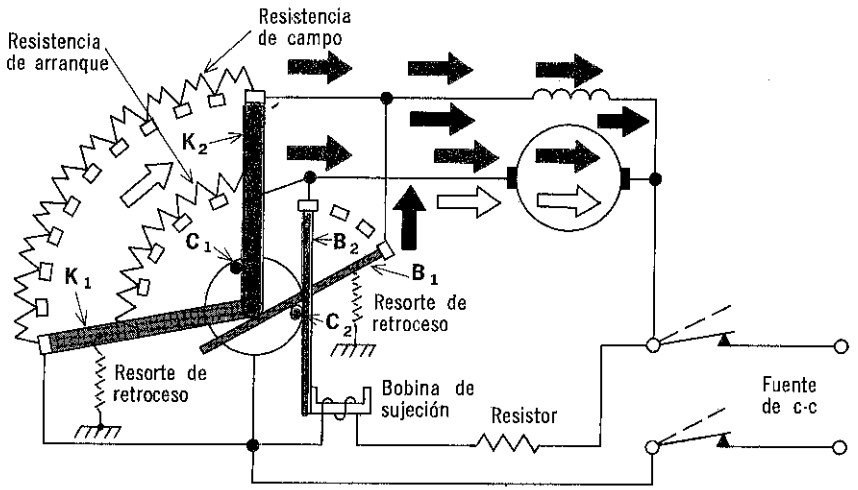
dispositivos de control para motores

Según se ha explicado previamente, los controles de motor combinan las funciones de arranque del motor y control de velocidad en un solo dispositivo. Hasta este punto, se han considerado solamente los arrancadores. En las descripciones del arrancador de contacto cuádruple se explicó cómo se usan los reóstatos de campo para controlar la velocidad de un motor. En ese caso, el reóstato de campo era independiente de la caja de arranque. Ahora se estudiarán los dispositivos control en los que se combinan las funciones de arranque y de control.



En general, los controles se usan exclusivamente en motores de derivación y compound acumulativo. Para mayor sencillez, la descripción se referirá a un motor de derivación. Actualmente se usan dos tipos de dispositivos de control: el *control para velocidad mayor que la normal* y el *control para velocidades superior e inferior a la normal.*

arranque a velocidad mayor que la normal

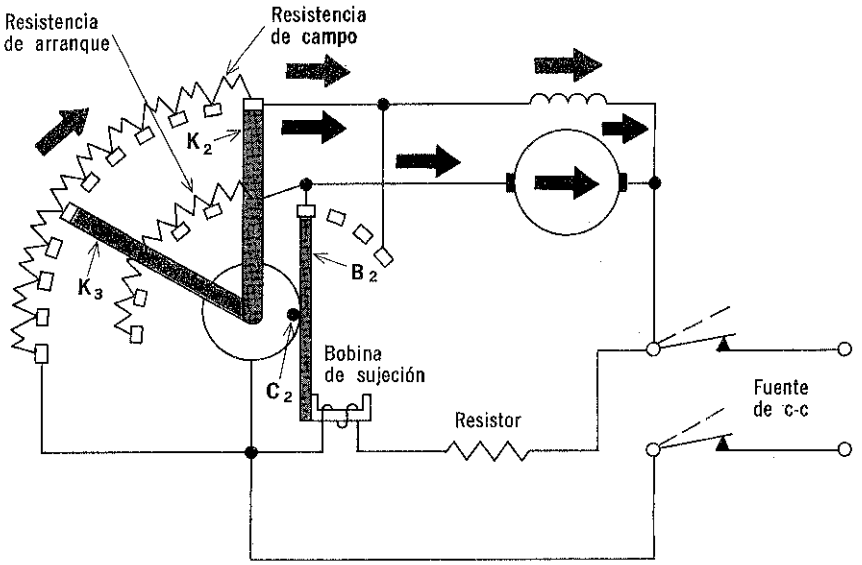


Aunque el control se asemeja a los arrancadores estudiados previamente, se incluye, además del mecanismo de arranque un mecanismo interior para controlar la velocidad del motor

El control para velocidad mayor que la normal combina las funciones del arrancador y el reóstato de campo en una sola caja de cara abierta. En el circuito de armadura del motor de derivación o del compound, la resistencia de arranque se usa sólo durante el periodo de arranque, lo cual limita la corriente de armadura en tanto el motor cobra su velocidad normal de funcionamiento. El circuito de resistencia de campo sólo interviene hasta que el motor alcanza su velocidad de funcionamiento.

En el dispositivo de control ilustrado hay dos hileras de contactos. La hilera superior de contactos pequeños, está conectada a la resistencia del campo en serie. La hilera inferior de contactos grandes está conectada a la resistencia de arranque, la cual está en serie con la armadura. El brazo de control K está conectado a ambos grupos de contactos.

En la posición de arranque que se ilustra, el brazo auxiliar B puentea la resistencia del campo y toda la tensión de la fuente se aplica al campo derivado. Al mover hacia la derecha el brazo K, la resistencia de arranque se corta del circuito y el motor se acelera. Al acercarse el brazo K a la posición de operación (K_2), el perno C empuja al brazo auxiliar B hacia la izquierda. El brazo B hace contacto con la bobina de sujeción en B_2 y queda aplicado a ella por la acción magnética. En este punto, el motor se habrá acelerado a su velocidad normal.



Una vez que el control se lleva a través del ciclo de arranque y el brazo del arrancador está en la posición de operación, la sección de control de velocidad puede ya utilizarse

control para velocidad mayor que la normal

En la figura se ilustra el control para velocidad mayor que la normal en posición de trabajo. Note que el brazo auxiliar B ha sido desconectado del circuito de campo, de manera que ya no está en corto con la resistencia de *campo*. Ahora el brazo B puentea la resistencia de *arranque*, y así proporciona una trayectoria para el voltaje de la fuente a la armadura.

Cuando el brazo B esté en la posición indicada, el brazo K podrá moverse sin que tenga efecto alguno sobre la corriente de armadura, pero sí influirá en la resistencia del circuito de campo. Si el brazo K se mueve hacia la izquierda, se agrega resistencia en serie con el devanado de campo y la velocidad del motor aumenta a algún valor mayor que el de la velocidad normal de funcionamiento. El brazo K se puede ajustar a cualquier posición para obtener una velocidad de funcionamiento mayor que la normal y que cumpla los requisitos para que trabaje el motor.

Para parar el motor, se abre el interruptor de línea, con lo cual el imán de sujeción libera el brazo B que, por la acción del resorte de retroceso, regresa a su posición, listo para arrancar de nuevo. Entonces, se libera el perno C; esto permite que el resorte de retroceso haga que el brazo K regrese a su posición original de apagado. Cuando ambos brazos han regresado a su posición original, el control está nuevamente listo para poner en marcha al motor.

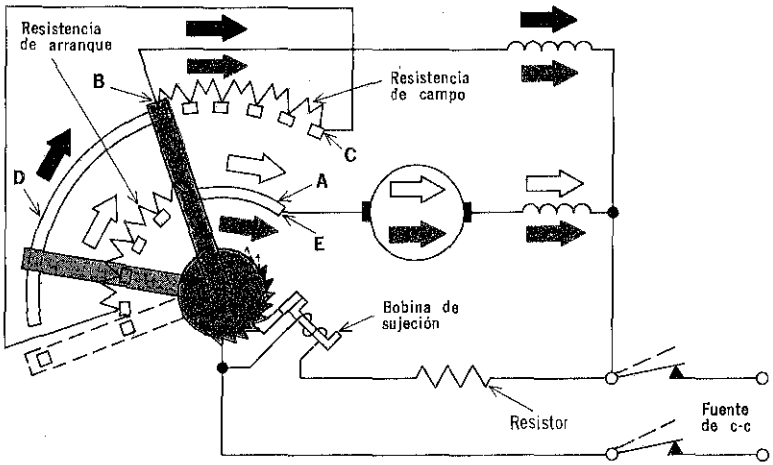
control de velocidades superior e inferior a la normal

Este tipo de control se utiliza para regular el funcionamiento de motores que deben trabajar con un amplio rango de velocidades, incluyendo aquellas que sean mayores o menores que la velocidad normal. Como puede apreciarse, el control de velocidades superior e inferior a la normal está ajustado para velocidades menores que la de funcionamiento. El brazo móvil está conectado a dos hileras de contactos: la inferior, conectada a la resistencia de arranque y la superior conectada a la resistencia del campo en serie.

Cuando el interruptor de línea está cerrado y el brazo móvil se mueve hacia la derecha, el motor arranca y se acelera gradualmente, primero, porque se quita la resistencia del circuito de armadura y segundo porque se agrega resistencia al circuito de campo. La velocidad normal se obtiene cuando el brazo hace contacto simultáneamente con los conductores circulares A y D, o sea, cuando está en el extremo superior de la resistencia de arranque y el punto B y el voltaje total de la línea llega tanto a los circuitos de armadura como a los de campo.

Antes de llegar a esa posición, la resistencia aún está en serie con la armadura y todo el voltaje de la línea llega al campo; en este caso el brazo está en contacto con el conductor circular D y la velocidad del motor será inferior a la normal.

El sistema de engrane en trinquete, accionado por la bobina de sujeción, fijará el brazo móvil en cualquier punto de contacto, permitiendo escoger distintas velocidades menores que la normal. En los otros arrancadores, un resorte de retroceso haría que el brazo regresara a la posición de apagado cuando éste se encontrara entre las posiciones de apagado y de funcionamiento.

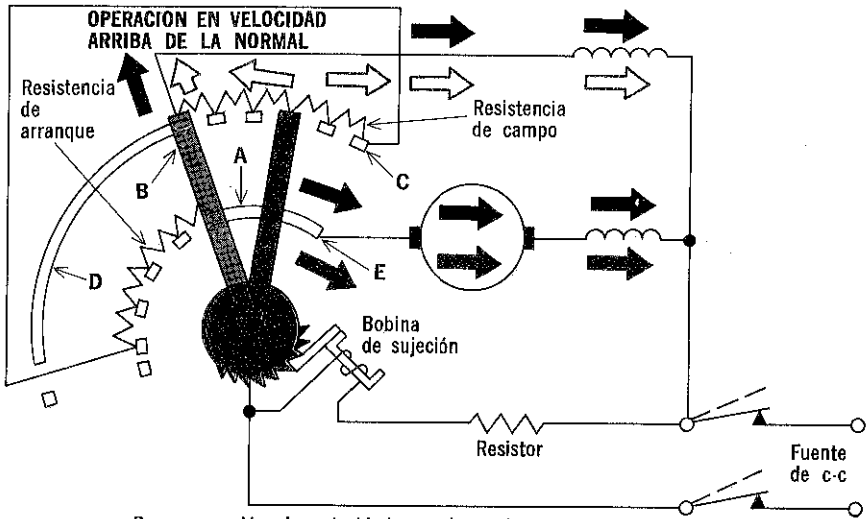


La operación de arranque del control de velocidades superior e inferior a la normal, se puede usar para llevar el motor a una velocidad que se desea abajo de la normal, dejándolo ahí. De ese punto, el motor puede llevarse a marcha más lenta o aumentarse su velocidad, según lo desee el operador

control de velocidades superior e inferior a la normal (cont.)

El control de velocidad superior e inferior a la normal también se puede graduar para obtener el funcionamiento deseado a velocidades mayores que la normal, según se indica en la figura.

Téngase presente que a la velocidad normal, todo el voltaje de la línea llega tanto a los circuitos de armadura como a los de campo. Esto sucede cuando el brazo móvil hace contacto simultáneamente con los conductores circulares A y D, en la posición B. Para el funcionamiento a velocidad menor que la normal, se conecta la resistencia al circuito de armadura, lo cual se logra moviendo el brazo hacia la posición en que queda sobre la resistencia interior o de arranque.



Para operación de velocidad superior a la normal de un controlador de amplio rango, se aplica pleno voltaje de armadura en tanto que la resistencia se inserta en serie con el devanado de campo

Para el funcionamiento a velocidad superior a la normal, se hace lo opuesto. Se mueve el brazo para establecer contacto con algún punto del conductor circular A, de manera que haga contacto simultáneamente con una derivación en la resistencia de campo. En estas condiciones todo el voltaje de la línea llega a la armadura al mismo tiempo que la resistencia queda conectada en serie con el devanado de campo. El campo más débil hace que el motor se acelere.

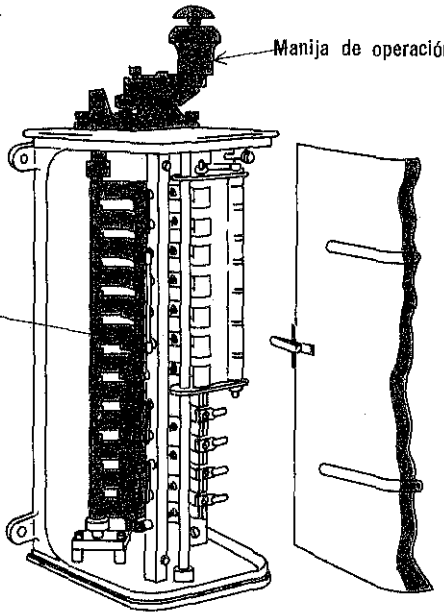
Como en el caso anterior, el brazo puede sujetarse sobre cualquiera de las derivaciones para obtener diferentes velocidades superiores a la normal. Cuando el brazo está en el punto C, se obtiene la máxima velocidad.

Cuando el interruptor de línea se abre para parar el motor, la bobina de sujeción libera el trinquete y el resorte de retroceso hace que el brazo regrese a la posición de apagado. Así, el control estará en posición de arranque del motor, para la siguiente vez que se aplique potencia.

controles de tambor

Los dispositivos de control que se han estudiado hasta este punto no suelen emplearse en motores cuyas aplicaciones requieren de frecuentes arranques, paradas y cambios de velocidad. Sin embargo, muchos de los motores que el lector probablemente conozca, como los que se usan en elevadores, grúas, máquinas-herramientas, etcétera, requieren la constante atención de un operador que ponga en marcha, acelere, reduzca la marcha, pare e invierta la operación según se necesite. Para este trabajo, se emplea un control manual que es suficientemente sólido para resistir el rudo manejo y el uso constante y continuo. A este tipo de dispositivo se le llama *control de tambor.*

El control de tambor facilita la operación de un dispositivo impulsado por motor que necesite ser cambiado constantemente en dirección y velocidad



Los controles ordinarios del tipo frontal se diseñan para ajustarse una vez, y dejarlos solos. El control de tambor está construido en forma robusta para resistir el desgaste y manejo del uso continuo

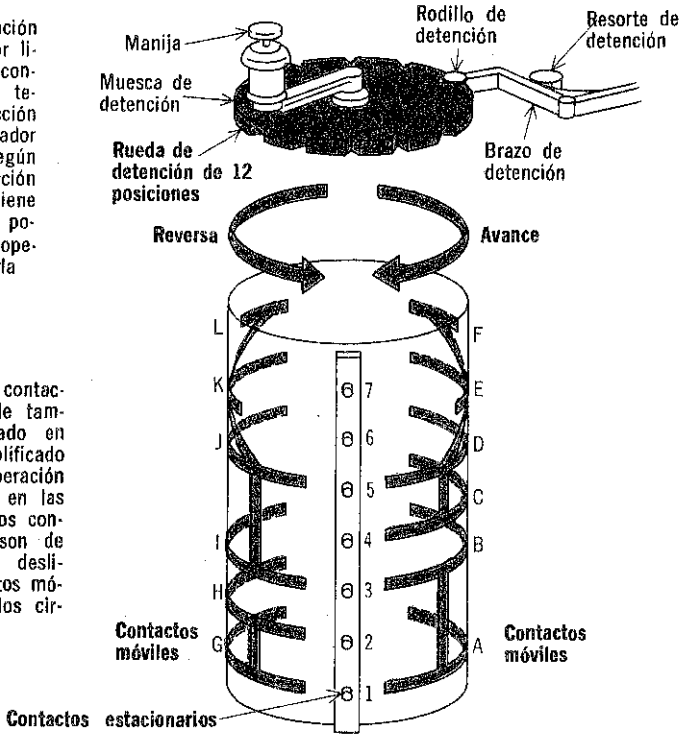
El control de tambor generalmente está dentro de una caja de forma cilíndrica, que tiene una manija montada en uno de sus extremos. Dentro de la caja hay contactos de interruptor para servicio pesado, los cuales están montados sobre un cilindro de tambor móvil y un juego de laminillas estacionarias, cada una de las cuales corresponde a un contacto. El cilindro de tambor está montado en un eje impulsor central y aislado de él; este eje termina en el exterior y está unido a la manija.

La manija se puede mover hacia la derecha o hacia la izquierda y permite tener control sobre un rango de velocidad en cualquier sentido de rotación.

control de tambor accionado mecánicamente

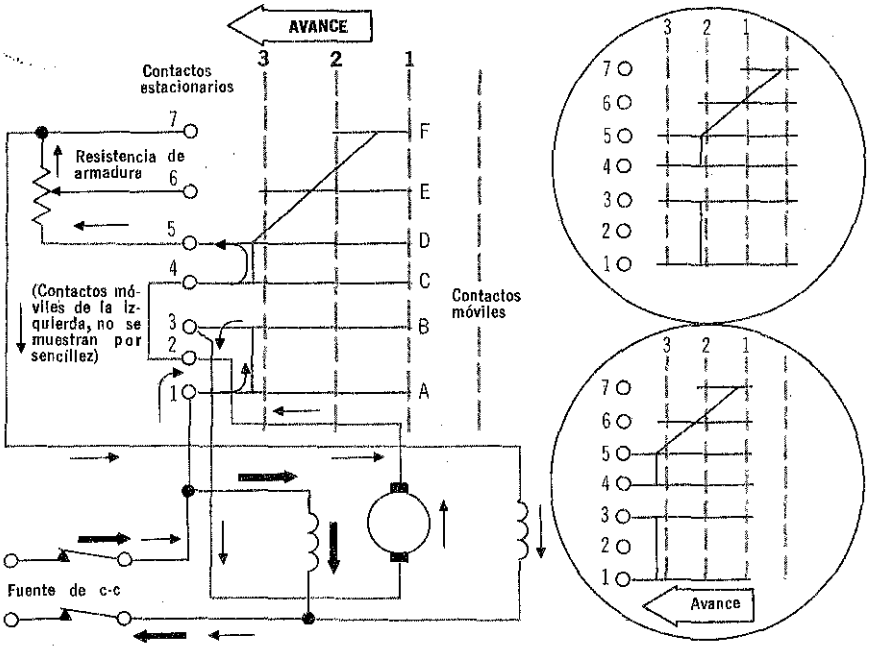
La acción de detención del control de tambor libera al operador del control constante. Para tener velocidad y dirección constantes, el operador coloca la manija según lo requiera y la acción de detención mantiene la operación en esa posición hasta que el operador decide cambiarla

La operación de los contactos en un control de tambor como el mostrado en este diagrama simplificado se estudiará para operación de avance y reversa en las páginas siguientes. Los contactos estacionarios son de hecho dedos que se deslizan contra los contactos móviles para conectar los circuitos



En el control de tambor el cilindro del tambor está aislado tanto del eje sobre el cual está montado como de la manija del eje. Los contactos están montados sobre el tambor móvil y los contactos estacionarios o *laminillas* están dispuestas de manera que tocan los contactos móviles del tambor según el operador haga girar la manija. Aunque estas laminillas estacionarias están aisladas entre sí, están conectadas a resistencias de arranque, interruptores inversos y otros elementos de los circuitos de arranque y control.

El control de tambor está dispuesto de manera que, una vez que la manija se ajusta en una posición, se mantiene ahí hasta que el operador la mueve nuevamente. Esto se logra por medio de un conjunto de rodillos y rueda muescada llamado *detent* que está montada sobre el eje central. Cuando se hace girar la manija, un resorte empuja el rodillo hasta una de las muescas de la rueda para mantener al tambor en la posición elegida.



control de tambor accionado eléctricamente

El diagrama muestra la forma en que se conecta un control de tambor a un motor compound. Cuando el operador coloca la manija en la posición de avance, el juego de contactos del tambor móvil mostrado a la derecha toca los contactos estacionarios que están en el centro. Este control proporciona tres velocidades de avance y tres de reversa.

En la primera posición de avance, toda la resistencia externa de armadura está en serie con ésta. Los contactos móviles A, B, C y D tocan los contactos estacionarios, 1, 3, 4 y 5. La corriente fluye de la fuente a 1, de 1 a A, de A a B, de B a 3 y de 3 a la armadura.

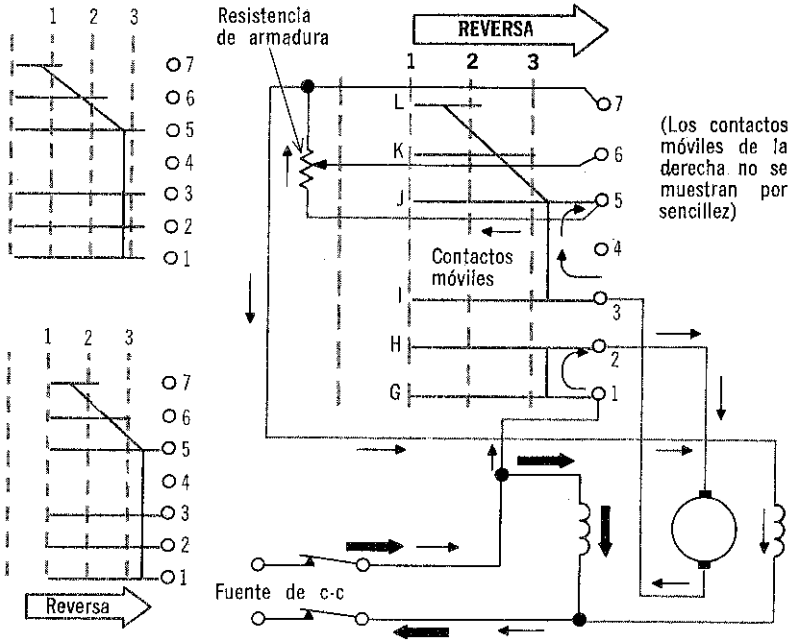
Después de pasar a través del devanado de armadura, la corriente pasa al contacto estacionario 2, de ahí al 4, luego al C; de C pasa a D, de D a 5 y de 5 al resistor, después al campo en serie y, finalmente regresa a la fuente.

En la segunda posición de avance se elimina parte de la resistencia por la conexión entre D, E y 6. En la tercera posición de avance, toda la resistencia es puenteada por la conexión entre E, F y 7 y la armadura está conectada directamente a la línea.

ESC. NAVAL ... GANTE
PROPIEDAD DE FERNANDO SILICEO
"ACERVO"

operación en reversa del control de tambor

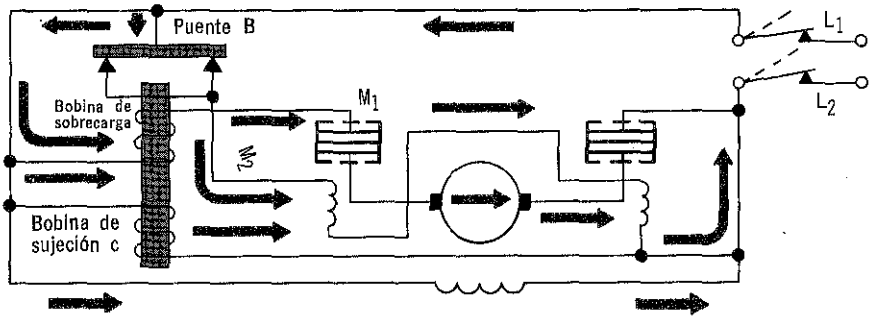
Si el operador regresa la manija de control hacia neutro y luego la hace girar en la dirección opuesta, se pasa a la primera posición de reversa en la cual toda la resistencia está nuevamente conectada en serie con la armadura. La corriente fluye de la fuente a 1, de 1 a G, de G a H, de H a 2, de 2 al devanado de armadura, de ésta a 3, de 3 a I, de I a J, de J a 5, de 5 al resistor, luego al campo en serie y nuevamente regresa a la fuente. Note que la corriente fluye a través de la armadura en dirección *opuesta* a como lo hacía en las posiciones de avance. Sin embargo, en los campos en derivación y en serie, la corriente fluye en la *misma* dirección que antes.



Según se ha explicado, si se invierte el flujo de la corriente, ya sea en la armadura o en el campo del motor de c-c, pero no en ambos a la vez, se invertirá la dirección de la rotación.

Si el operador coloca su manija en la segunda posición de reversa, parte de la resistencia de armadura queda desconectada del circuito de armadura, debido a la conexión entre J, K y 6. Y, como antes, al colocar el sistema en la tercera posición de reversa, la armadura se conecta directamente con la línea por medio de la conexión entre K, L y 7.

dispositivos de control automático



El contactor magnético es el corazón de todos los controles automáticos. El objetivo final del contactor es conectar el motor a la línea de alimentación. La operación del contactor generalmente se inicia operando un interruptor remoto u oprimiendo un botón

Los dispositivos de botón que se usan para poner en marcha y controlar motores son los elementos de control remoto de los sistemas de control de motores y comúnmente se les conoce como *controles automáticos*; son convenientes y con ellos se evita que el operador cometa errores que redunden en perjuicios para el equipo.

El elemento clave en los controles automáticos es un dispositivo interruptor llamado *contactor magnético,* que, en última instancia, conecta el motor a la línea de potencia. Este interruptor es magnético u operado por relevador.

La figura muestra un sistema de contactor magnético elemental, conectado a un motor de derivación. Cuando el circuito se cierra en L_1 y L_2, los contactores M_1 y M_2 quedan energizados y cerrados. La trayectoria de la corriente a través de ellos incluye al circuito B, un llamado *elemento de puenteo,* el cual tiene dos terminales conectadas a las bobinas de M_1 y M_2. Una placa metálica que se encuentra en las puntas de estas dos terminales se conecta eléctricamente al lado L_1 de la línea de potencia y la placa queda sobre las terminales sólo por la acción de la gravedad. La bobina de sujeción C evita que el émbolo altere esta disposición durante el funcionamiento normal.

Al cerrar los contactos M_1 y M_2 se energiza al motor. La corriente sale de L_1 y fluye hacia la bobina de sobrecarga OL, luego al contacto M_1, la armadura, el contacto M_2 y, finalmente, hasta la línea de potencia L_2. La bobina de campo está energizada en una trayectoria en paralelo.

Una vez energizado, el control mantiene al motor funcionando en condiciones normales. En caso de una sobrecarga, la armadura toma una corriente excesiva y la bobina de sobrecarga OL que está en serie con la armadura, energiza y vence el efecto de la bobina de sujeción C; mueve al émbolo hacia la bobina para establecer contacto y elevar el puente B. Así pues, se interrumpe la trayectoria de la corriente a través de las bobinas de M_1 y M_2, contactos de M_1 y M_2 se abren y el motor se para.

resumen

☐ Mediante los dispositivos de control de los motores, se obtienen el arranque y el control de velocidades para los motores de derivación y compound acumulativo. ☐ El control para velocidad superior a la normal consta de dos resistencias: una por el circuito de armadura y otra para el circuito de campo. ☐ Al arrancar, primero se mueve hacia arriba el brazo del reóstato para reducir lentamente la resistencia de armadura hasta que se alcanza la velocidad normal. Luego se puede regresar el brazo a cualquier posición, para introducir resistencia al circuito de campo y aumentar la velocidad.

☐ El control para velocidades superior e inferior a la normal tiene también dos grupos de resistencias; pero el brazo de control se conecta simultáneamente con ambas resistencias. ☐ Al mover el brazo del reóstato de la posición de apagado, se reduce la resistencia de armadura y aumenta la resistencia del campo, lo que permite tener control, tanto a menos velocidad que la normal como a ésta. ☐ A velocidad normal, el brazo desconecta toda la resistencia de los circuitos de armadura y campo. ☐ Al moverse aún más el brazo, se agrega resistencia sólo al circuito de campo para obtener control a velocidad superior a la normal.

☐ Los controles de tambor se usan en motores que requieren frecuentes paradas, arranques e inversiones, así como cambios de velocidad. ☐ Los tambores que se usan tienen contactos superficiales dispuestos de modo que hacen que gire el tambor, tocan o dejan de tocar contactos deslizantes, para establecer trayectorias de circuito que pueden aplicar potencia, aumentar resistencia e invertir las conexiones para obtener arranque y control de velocidad en direcciones de avance y reversa.

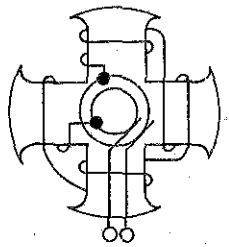
preguntas de repaso

1. ¿De qué manera difieren los dispositivos de control de los de motor de los arrancadores?
2. ¿En un control de velocidad superior a la normal, en qué dirección debe moverse el brazo del reóstato para aumentar resistencia al circuito de campo?
3. Con referencia a la pregunta 2, ¿tendrá eso algún efecto antes de alcanzar la velocidad normal? ¿Por qué?
4. ¿Qué clases de motores son los que generalmente están provistos de controles?
5. ¿Cuántos juegos de resistencias tiene un control de motor de velocidades superior e inferior a la normal?
6. Con un control de velocidades superior e inferior a la normal, ¿cuándo cambia la resistencia de armadura? ¿Cuándo cambia la resistencia de campo?
7. Con el control de velocidad mayor que la normal, ¿cómo se derivan las resistencias para velocidad normal?
8. ¿Cuándo son más útiles los controles de tambor?
9. ¿Qué otro control adicional de motor proporciona el mismo resultado que un control de tambor?
10. Cuando el brazo de un control está colocado en la posición deseada, ¿cómo difiere la forma en que se sujeta el brazo un control de tambor en esa posición con respecto a los demás tipos de control?

motores de c-a

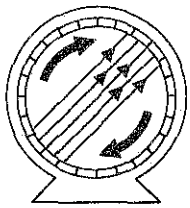
En un motor de c-a, lo mismo que en un motor de c-c, la energía eléctrica se transforma en energía mecánica. Como lo implica su nombre, para impulsar a los motores de c-a se usa corriente alterna en lugar de corriente continua. Como la mayor parte de la potencia comercial es alterna, los motores de c-a son más fáciles de usar que los de c-c, que requieren equipo especial de conversión.

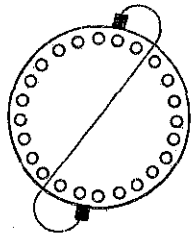
La base del control c-a es la rotación del campo magnético del estator



Fuente de c-c

El rotor del motor síncrono se conecta a una fuente de c-c





El rotor del motor de inducción no tiene conexiones externas

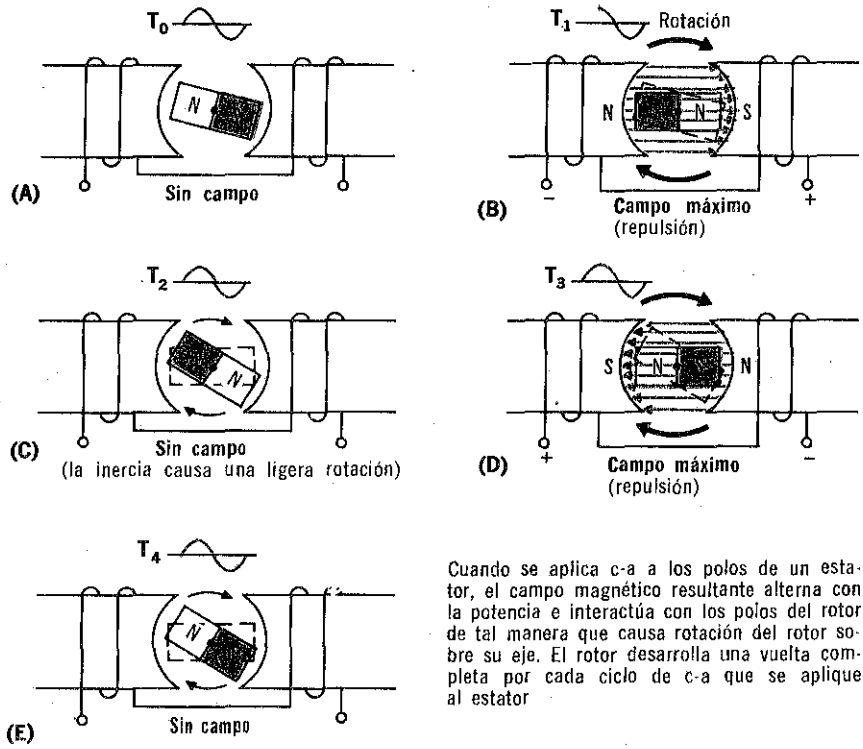
Debido a que todavía existen regiones en las que se usa la c-c, los fabricantes de aparatos han impulsado la producción de un motor que puede funcionar con c-a y con c-c; éste se llama motor de ca-cc o *universal* y es el que se usa en algunas aspiradoras, taladros eléctricos, etcétera; el principio de su funcionamiento se parece más al del motor de c-c que al de c-a. Por lo tanto, el motor universal, lo mismo que el de c-c, tiene algunas desventajas que pueden evitarse en motores de c-a, especialmente, la necesidad de conmutación.

La conmutación requiere que algunas partes del motor froten con otras cuando el motor está funcionando, de manera que el motor se va desgastando, literalmente. En cambio, el motor de c-a puro no depende de la conmutación para su funcionamiento.

Existen diversas clases de motores de c-a. En el volumen 6 se estudió el generador de c-a o alternador; en este volumen se estudiarán generadores que pueden usarse como motores. Cuando se conecta un alternador para usarlo como motor, se convierte en otra clase de motor de c-a llamado *motor síncrono*. Quizá la forma más pura de un motor de c-a es el *motor de inducción*, que no tiene conexión física entre su parte rotatoria o *rotor*, y el estacionario o *estator*. Una tercera clase, es el motor de conmutador de c-a que incluye al motor universal ca-cc.

funcionamiento

Como se alimenta potencia de c-a al devanado del estator, el campo generado entre los polos *alterna* con la potencia alterna aplicada; al hacerlo, el campo se establece desde cero hasta un máximo en una dirección, se reduce, pasa nuevamente por cero y luego repite el ciclo en la dirección opuesta. El *rotor* del motor básico de c-a se comporta como si fuese un imán permanente.



Cuando se aplica c-a a los polos de un estator, el campo magnético resultante alterna con la potencia e interactúa con los polos del rotor de tal manera que causa rotación del rotor sobre su eje. El rotor desarrolla una vuelta completa por cada ciclo de c-a que se aplique al estator

Cuando se empieza a aplicar una corriente alterna al estator electromagnético, en el instante T_0 no se origina campo magnético entre los polos del estator, ya que la corriente es nula.

Sin embargo, en el tiempo transcurrido entre T_0 y T_1, se origina un campo que aumenta según lo hace la corriente aplicada. El estator se pone en marcha y así da origen a polos magnéticos. Como los polos del mismo signo se repelen, el rotor es repelido primero por el campo magnético. Luego, como polos opuestos se atraen, el rotor continuará girando hasta que sus polos norte y sur queden frente a polos opuestos del estator.

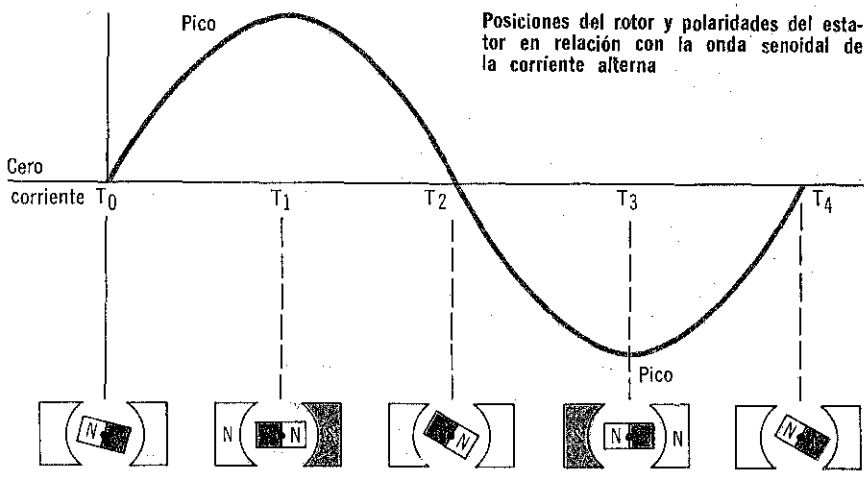
funcionamiento (cont.)

Si la polaridad de la corriente del estator no cambiara, el rotor quedaría sujeto en la posición indicada en la posición B de la página 7-90. Sin embargo, como se usa c-a, la corriente del campo comienza a reducirse después del instante T_1 y el rotor continúa girando por *inercia*. En el instante T_2, cuando la corriente aplicada vuelve al valor cero, el campo magnético del estator también se nulifica; como se ilustra en C el rotor es impulsado por su propia inercia. Sin embargo, entre T_2 y T_3, la alternación de potencia se establece en la dirección opuesta. La polaridad de los polos magnéticos del estator se invierte y el rotor es repelido nuevamente.

El rotor gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj hasta que llega a la posición D, en donde nuevamente se mantendría estacionario por la fuerza de atracción del estator si la c-a no disminuyera e hiciera posible que la inercia lo impulsara más allá de la posición A; nuevamente en esta posición, la potencia de c-a suministrada al campo alterna otra vez para invertir el campo y el ciclo se repite para mantener girando al rotor.

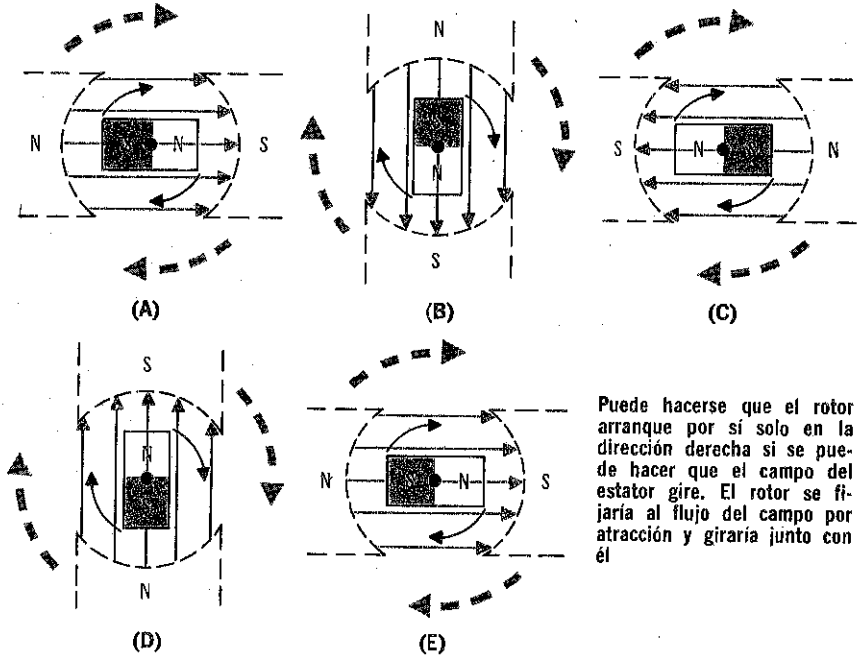
Cabe notar que en A y en C el rotor está ligeramente más allá de las posiciones de flujo máximo de B y D. Esta ligera rotación producida por la inercia del rotor es importante debido a que hace posible que continúe la acción del motor.

Si el rotor estuviese exactamente en una posición paralela a la del campo de B y D, su rotación no sería posible debido a que la repulsión magnética sería igual en ambas direcciones de rotación; por lo tanto, el rotor no se movería en ninguna dirección. Esto significa que no hay seguridad de que el motor de c-a básico mostrado a continuación arranque por sí solo. Además, en la ilustración el rotor sólo gira en el mismo sentido que las manecillas del reloj porque inicialmente se desplazaba en esa dirección; si originalmente se estuviera desplazando en la otra dirección, entonces giraría en sentido contrario.



rotación del campo del estator

Las desventajas básicas del motor simple de c-a que se acaba de estudiar son que podría no ponerse en marcha por sí mismo y, si lo hiciera, tal vez no siguiera la dirección correcta. Ambos fenómenos dependen de la posición que tome el rotor cuando se empiece a aplicar la potencia. De hecho, este rotor tal vez no pueda siquiera arrancar independientemente de la posición en que se encontrara debido a que el campo solamente alterna en un sentido y el contrario lo hace tan rápidamente —60 veces por segundo— que el rotor tal vez no tenga suficiente tiempo para seguirlo. Así, para poner en marcha el motor, sería necesario hacerlo girar a mano en la dirección en que se desea que funcione hasta que adquiera suficiente rapidez para seguir al campo alterno.



Puede hacerse que el rotor arranque por sí solo en la dirección derecha si se puede hacer que el campo del estator gire. El rotor se fijaría al flujo del campo por atracción y giraría junto con él

La mejor manera de superar esta desventaja es hacer que el campo magnético del estator *gire* en lugar de simplemente alternar. De esta manera, al girar el campo, sus polos giratorios atraerían los polos opuestos del rotor; el rotor quedaría sujeto en una posición por la atracción magnética y giraría con el campo.

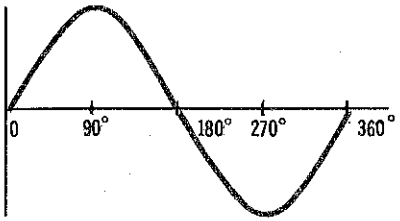
En los motores prácticos de c-a, se aplican diversos métodos para hacer que el campo del estator gire eléctricamente. En motores monofásicos de c-a, el efecto se produce dividiendo una fase y desplazando la potencia de c-a que llega al devanado del estator; en tanto que en motores polifásicos de c-a, las diferencias naturales de fase, entre los diferentes voltajes producen el efecto rotatorio.

rotación del campo magnético

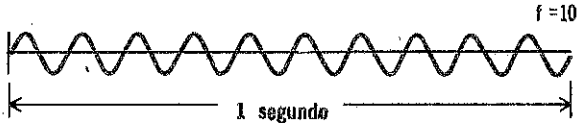
La corriente alterna tiene algunas propiedades especiales que hacen posible aprovecharla para producir un campo magnético rotatorio en el estator de un motor de c-a. Se ha explicado previamente, que la corriente alterna tiene ciclos de ascenso y descenso y que estos ciclos siguen un patrón que se llama *onda senoidal*, o *sinusoidal*. Un ciclo sinusoidal completo de 360° se repite según la frecuencia nominal de c-a. Dos corrientes alternas diferentes con la misma frecuencia se pueden estar *en fase* o *defasadas*.

Las corrientes alternas defasadas se describen aún más en función de su diferencia relativa en ángulo de fase, en un instante determinado. Así, se puede decir que las corrientes están *en fase* cuando aumentan y disminuyen simultáneamente; o bien, que están *defasadas* 180 grados entre sí, cuando una comienza a aumentar de valor a partir de cero y, simultáneamente, la otra comienza a disminuir a partir de cero. Cuando las corrientes están defasadas 90 grados entre sí, una de ellas alcanza su máximo valor cuando la otra está en cero.

Si se divide la entrada de c-a en dos corrientes alternas defasadas en 90°, mediante un devanado de estator especialmente dispuesto en un motor de c-a, es posible producir alternadamente una serie de polos electromagnéticos que producen el efecto de un campo magnético rotatorio.

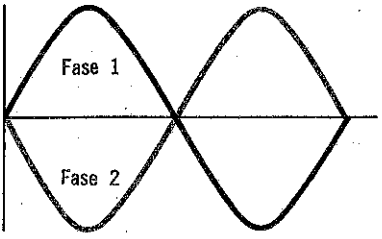


Una onda senoidal de c-a representa 360 grados eléctricos

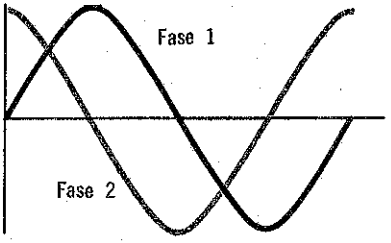


El número de ciclos que ocurren en un intervalo de tiempo dado, recibe el nombre de frecuencia

Una comparación de los voltajes de c-a disponibles simultáneamente, muestra que existen relaciones de fase entre señales de c-a



1 y 2 están 180° defasados

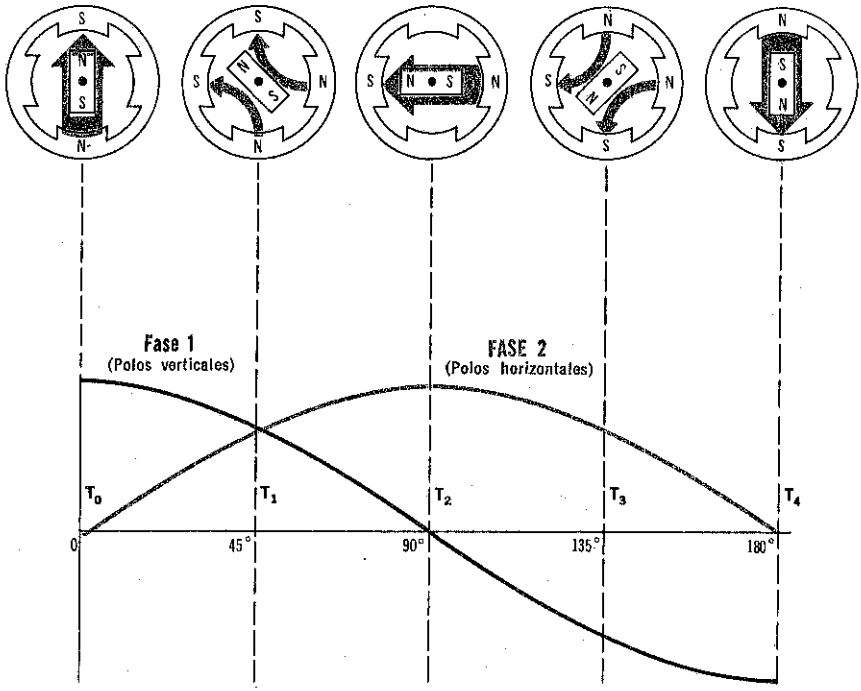


1 y 2 están 90° defasados

principios de rotación del campo magnético

Cuando se sabe cómo pueden existir corrientes alternas con relaciones de fase diferentes entre sí, es más fácil comprender la forma en que puede producirse un campo magnético en el estator de un motor de c-a.

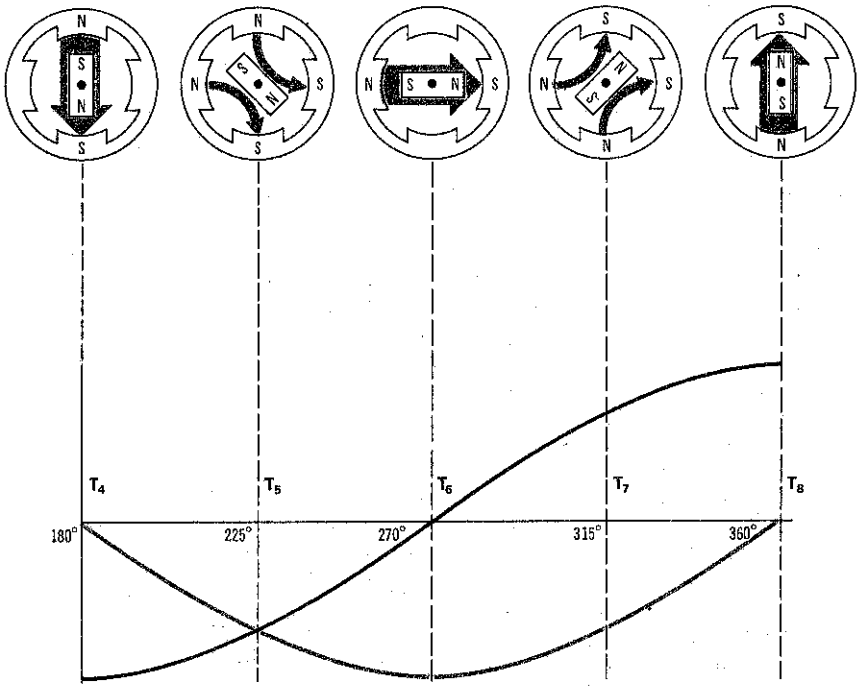
Observe que, en la ilustración, en T_0, la corriente alterna de la fase 1 se está alimentando a los devanados verticales del estator, en tanto que la corriente alterna defasada en 90 grados (fase 2) alimenta a los devanados horizontales. En este instante del arranque, la fase 1 produce un campo magnético vertical máximo, en tanto que la fase 2 no produce campo horizontal.



Al llegar al instante T_1, la corriente fluye en los devanados tanto vertical como horizontal y este flujo se produce entre polos adyacentes, como se ilustra en la figura. En T_2, existen las condiciones exactamente opuestas a las iniciales. En este caso, la fase 2 produce el flujo máximo en el devanado horizontal, en tanto que el flujo de la fase 1, del devanado vertical, es nulo. El efecto total es que el campo magnético que se inició en T_0 girará en sentido contrario al de las manecillas del reloj, de manera que en el instante T_2 el polo se encuentra en un plano que forma ángulo recto con el plano de T_0.

principios de rotación del campo magnético rotatorio

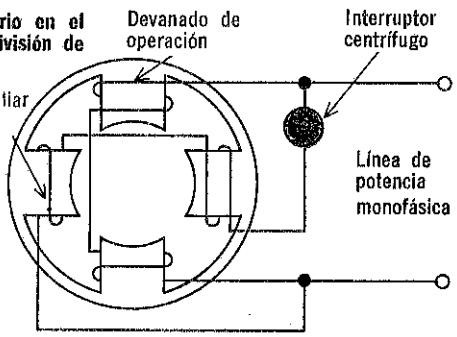
Entre T_0 y T_2, la intensidad del polo vertical inicial disminuye gradualmente, en tanto que la intensidad del polo horizontal aumenta. Entre T_2 y T_4, el proceso continúa. Para T_3, la intensidad del polo horizontal ha disminuido mientras que la intensidad del polo vertical ha comenzado a aumentar nuevamente. Esta vez, el campo vertical está en una nueva dirección, lo cual explica el hecho de que la corriente alterna esté aumentando en una nueva dirección. Para T_4, el campo horizontal ha disminuido hasta cero, en tanto que el campo vertical ha ascendido al máximo en la nueva dirección.



Revisando la acción entre T_0 y T_4 como un proceso continuo, nótese que el polo magnético ha girado gradualmente hasta 180 grados. Entre T_4 y T_8 el proceso continúa en la misma dirección, hasta que en T_8 el polo magnético ha regresado a la fase original de T_0. Para un ciclo de corriente alterna, el campo magnético ha girado 360 grados. Incidentalmente, la velocidad natural a la cual gira el campo magnético en el estator se llama *velocidad síncrona.*

Puede crearse un campo magnético rotatorio en el estator con potencia c-a monofásica, por división de fase

La división de fases se puede lograr por medio de un devanado auxiliar de arranque construido en el estator. El devanado de arranque tiene una inductancia mucho menor que el devanado de operación por lo que da menos desplazamiento de fase a la corriente de c-a aplicada a él de manera que está fuera de fase con respecto a la corriente principal que se aplica al devanado de operación. Sus campos magnéticos pues, también están fuera de fase, de manera que crean virtualmente un campo rotatorio



división de fase

Como la potencia comercial que ordinariamente llega a los hogares es *c-a monofásica,* debe contarse con algún medio, ya sea en el circuito eléctrico del hogar o en el motor, para obtener dos fases provenientes de la potencia monofásica original, si se desea usar para poner en marcha y hacer que funcione un motor de c-a. El proceso de obtener dos fases en una se conoce como *división de fase.* Generalmente el medio para dividir c-a monofásica en dos fases se encuentra dentro del circuito del estator del motor de c-a. Una vez que se ha dividido apropiadamente la fase, se pueden usar las dos fases obtenidas para originar el campo magnético rotatorio.

Un medio para dividir la fase es un devanado auxiliar especial montado en el estator que se llama *devanado de arranque,* para diferenciarlo del *devanado de funcionamiento* real del estator. En la mayor parte de los motores de c-a de fase dividida, el devanado de arranque sirve sólo para poner en marcha el motor. Tiene una alta resistencia y una baja reactancia inductiva, en tanto que el devanado de operación tiene baja resistencia y alta reactancia; los dos devanados tienen características eléctricas diferentes. Cuando se empieza a aplicar potencia, ambos devanados se energizan. Debido a sus diferentes reactancias inductivas, el devanado de operación tiene una corriente que está atrasada con respecto a la corriente del devanado de arranque, dando origen a una diferencia de fase entre una y otra. Idealmente, la diferencia de fase debería ser de 90° pero en los motores prácticos, es mucho menor. Sin embargo, los devanados producen campos defasados. Esto origina un campo magnético rotatorio en el estator, que aplica par al rotor, poniendo en marcha al motor.

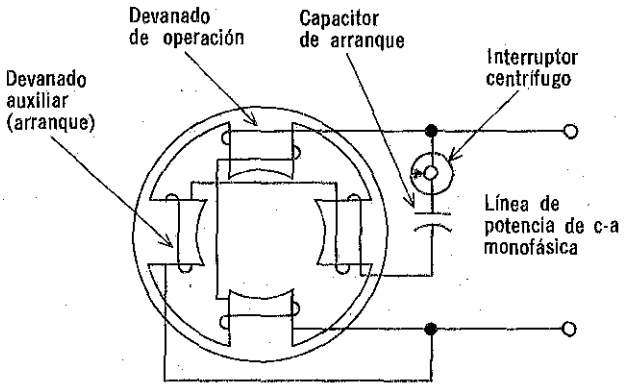
Una vez que el motor ha alcanzado aproximadamente el 80% de su velocidad normal de funcionamiento, el rotor sigue las alternaciones del campo magnético originadas por el devanado de funcionamiento. Para reducir al mínimo las pérdidas de energía, el devanado de arranque se desconecta del circuito por medio de un mecanismo llamado *interruptor centrífugo,* debido a que funciona por la fuerza centrífuga originada por las revoluciones del rotor. La dirección de un campo rotatorio de fase dividida puede cambiarse, invirtiendo las conexiones al devanado de arranque, lo cual invierte la dirección inicial del desplazamiento de fase; esto significa que el campo magnético general gira en la dirección opuesta.

arranque accionado por capacitancia

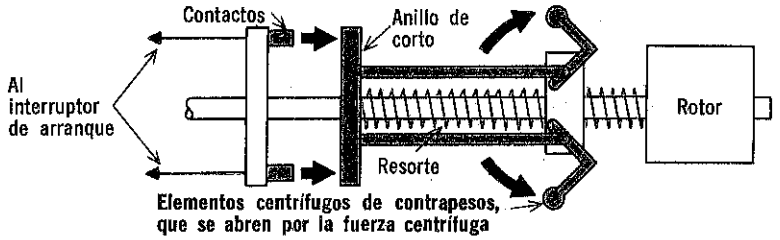
Cuando se describió el campo rotatorio de fase dividida, se hizo notar que la diferencia de fase entre los devanados de arranque y operación es mucho menor a 90 grados. El par de arranque que produce un motor con estator de fase dividida también es inferior al máximo que podría obtenerse con una diferencia de fase ideal de 90 grados.

Puede obtenerse un desplazamiento de fase más cercano a los 90 grados ideales si se utiliza un sistema de arranque por capacitor para originar un campo rotatorio en el estator. Este sistema es una modificación del sistema de fase dividida; un capacitor de arranque de alto valor se conecta en serie con el devanado de arranque del estator para obtener un desplazamiento de fase de aproximadamente 90 grados para la corriente de arranque. Como resultado, el par de arranque que resulta, aumenta considerablemente en relación con el sistema común de fase dividida.

El devanado de arranque del estator con arranque por capacitor suele tener una resistencia más baja y un número de vueltas mayor que el tipo común de fase dividida, de manera que es más eficiente. En algunos motores de capacitor, el devanado de arranque con capacitor queda conectado en el circuito aun después del arranque, para obtener un mejor funcionamiento del motor. Sin embargo, en la mayor parte de los motores comunes, el capacitor y el devanado de arranque se desconectan del circuito por medio de un interruptor centrífugo, como en el caso de un motor común de fase dividida. Un método sencillo para invertir la dirección de la rotación de un motor de capacitor es el mismo que se aplicó en el caso del motor de fase dividida; es decir, invertir las conexiones a las puntas del devanado de arranque.

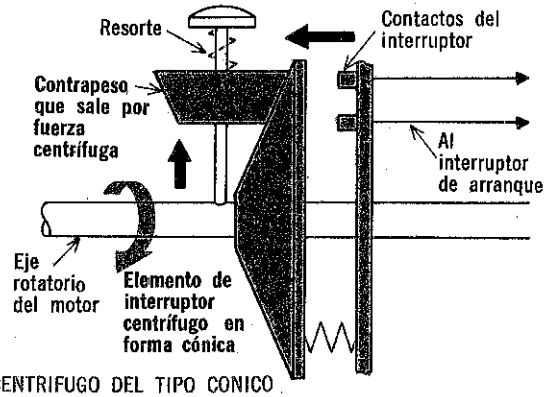


En el motor de arranque por capacitor, el desplazamiento de fase entre los devanados de funcionamiento y de arranque se aproxima al ideal de 90° debido a la acción del desplazamiento de fase del capacitor



INTERRUPTOR CENTRIFUGO DEL TIPO DE PESOS

Los interruptores centrífugos generalmente tienen contactos normalmente cerrados y se operan por la acción rotatoria del motor. La fuerza centrífuga hace que los elementos de operación se desplacen radialmente hasta que los contactos del interruptor se abren. Los contactos permanecen abiertos hasta que el motor ha reducido considerablemente su velocidad o se para totalmente



INTERRUPTOR CENTRIFUGO DEL TIPO CONICO

interruptor centrífugo

Aunque se usan muchas variedades de interruptores centrífugos para controlar la conexión del devanado de arranque y capacitores de arranque, todos constan de dos partes básicas: un brazo de interruptor y un contacto de interruptor. Parte del interruptor centrífugo está montado sobre el rotor del motor, o el eje del rotor. La disposición y el tipo de brazo y contactos específicos usado dependen de la aplicación de que se trate. Al brazo del interruptor generalmente se le aplica una carga o peso de alguna manera y está dispuesto de modo que normalmente los contactos del interruptor se mantienen cerrados debido a la tensión de un resorte. Esto significa que, antes del arranque, el devanado de arranque y/o el capacitor de arranque siempre están conectados.

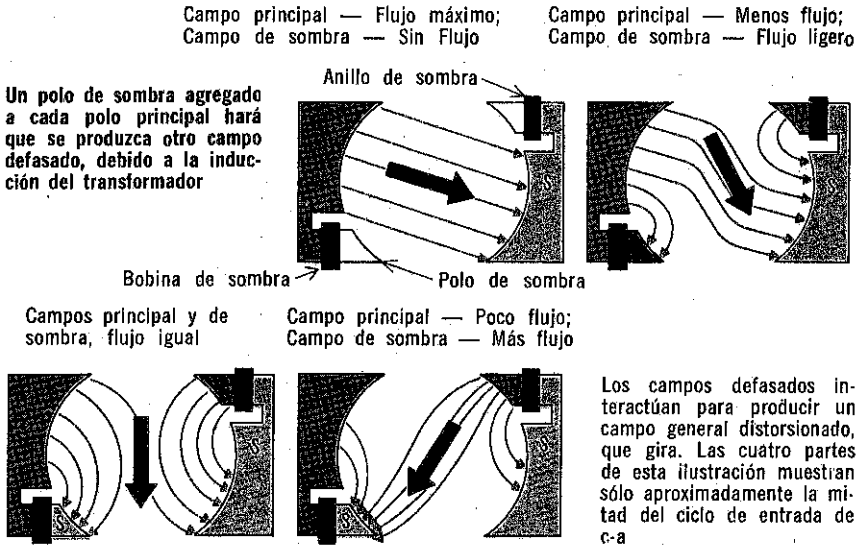
Al adquirir velocidad el motor, después del arranque, la fuerza centrífuga empuja el brazo contrapesado que a su vez vence la tensión del resorte y abre los contactos del interruptor para desconectar al devanado de arranque y el capacitor. Mientras el motor funciona, el interruptor permanece en la posición abierta; cuando se para el motor, los resortes hacen que el interruptor centrífugo vuelva a su posición original de arranque, reconectando al devanado de arranque y al capacitor.

La figura representa dos tipos de interruptores centrífugos. De los dos, el cónico es el más común en el motor de los aparatos domésticos. En cambio, el esférico se usa más en motores industriales grandes.

motor con espira de sombra

Otra forma de producir el efecto de un campo magnético rotatorio es dividir cada polo del estator de un motor monofásico simple de c-a en dos secciones, una de ellas rodeada con un *conductor grueso* de conexión en corto, por ejemplo una espira anular de cobre conectada en corto. Esta disposición de *bobina de sombra,* desplaza al eje de los polos sombreados, del eje de los polos principales. Cuando se aplica potencia al estator, el flujo en la parte principal del polo induce un voltaje en la bobina de sombra, que actúa como devanado secundario de un transformador.

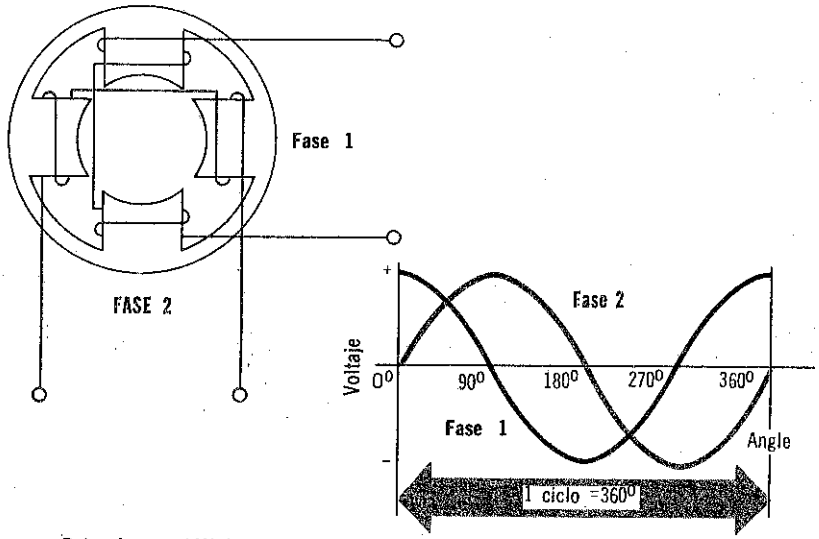
Como la corriente en el devanado secundario de un transformador está defasada con respecto a la corriente del devanado primario (Vol. 3) la corriente en la bobina de sombra está defasada con respecto a la corriente del devanado del campo principal. Así pues, el flujo del polo de sombra está defasado con respecto al flujo de polo principal. Por lo tanto, en un instante dado, el flujo de campo pasará entre las secciones del polo principal y luego entre las secciones del sombreado. En otro instante, el flujo entre los polos interactuará para producir un campo distorsionado que siga un patrón rotatorio. Como el campo no sigue una rotación suave de 360 grados generalmente se usan polos envolventes para hacer más efectivo el patrón de flujo cambiante.



Los motores de polos de sombra se pueden construir de modo que giren en el mismo sentido que las manecillas del reloj o en sentido contrario. Eso se controla por la posición de la bobina de sombreado. Además, estos motores se pueden construir para que sean reversibles, poniendo en cada pieza polar un par de bobinas de sombra. Una u otra del par se conecta por medio de un interruptor externo, para determinar la dirección de rotación.

motor de c-a bifásica

Al estudiar los métodos de fase dividida y de arranque por capacitor para producir un campo rotatorio en el estator, se dijo que el objetivo del sistema era obtener dos corrientes alternas defasadas en 90 grados dentro del circuito del estator, comenzando con la fuente de energía original monofásica de alimentación doméstica. Si en lugar de tener potencia monofásica de c-a se dispusiera de potencia bifásica de c-a defasada en 90 grados, sería innecesario dotar al estator con los elementos para la división de fase. En lugar de ello, podría disponerse el estator como se ilustra en la figura, con una fase de c-a aplicada separadamente a cada uno de ambos pares de devanados de estator, lo cual equivale a tener la división de fase en la estación generadora antes de suministrarle potencia al motor.



Potencia c-a bifásica creada fuera del estator mismo, que se pueda aplicar directamente al estator para generar un campo magnético rotatorio

Además, como la diferencia de fase está controlada perfectamente en 90 grados con una fuente generadora de potencia para cada línea, no sólo es posible usar la potencia bifásica para poner en marcha al motor, sino también para hacerlo funcionar. El funcionamiento es deficiente, ya que no hay pérdidas en un capacitor o como resultado de un desplazamiento de fase inferior a los 90 grados ideales. El motor bifásico de c-a tiene un buen par de arranque y buen par de funcionamiento. Como nota histórica interesante, Nikola Tesla, que inventó el motor de inducción de c-a, concibió y construyó su primer motor para que fuese impulsado con energía bifásica de c-a.

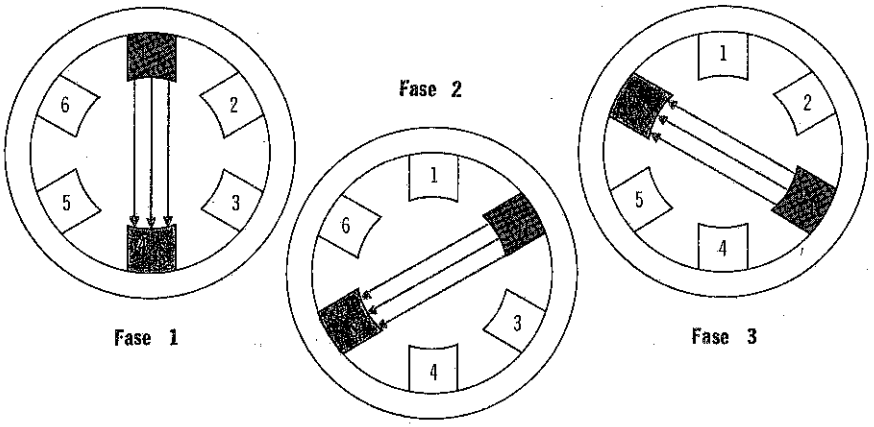
motor trifásico

Hasta ahora se han estudiado los campos rotatorios de estator producidos a partir de potencia monofásica y bifásica de c-a. La potencia monofásica de c-a está en una categoría propia; pero la potencia bifásica sólo pertenece a una categoría más amplia de potencias *polifásicas* (de más de una fase).

Las compañías de electricidad normalmente generan y transmiten potencia de c-a trifásica. La potencia de c-a monofásica para el hogar se obtiene de una fase de las líneas trifásicas de potencia de c-a. Los motores trifásicos son comunes en la industria debido a que las compañías de electricidad suministran líneas de potencia trifásica de c-a a los usuarios industriales, cuando éstos lo solicitan.

El origen de un campo de estator rotatorio que consuma potencia trifásica es similar al principio del sistema de fase dividida o bifásico. En el sistema trifásico, se genera un campo magnético rotatorio en tres fases, en lugar de dos. En la ilustración, las tres fases de corriente alterna están desplazadas 120 grados entre sí. Cada una de ellas alimenta a uno de tres pares de polos separados. En la primera posición, la fase 1 tiene la magnitud máxima, aplicando el campo entre el polo 1 y el polo 4. En la segunda posición, la fase 2 tiene la mayor magnitud y rige el campo entre los polos 2 y 5. En la tercera posición, la fase 3 tiene la máxima magnitud y rige el campo de los polos 3 y 6.

El sentido de la rotación del campo en un motor trifásico puede cambiarse invirtiendo dos puntas cualesquiera del estator, lo cual desplaza las fases de manera que el campo magnético gire en dirección opuesta.



resumen

☐ Como la mayor parte de la potencia comercial es c-a, los motores que consumen este tipo de corriente son más fáciles de usar que los motores de c-c. ☐ El motor básico de c-a dotado de un imán permanente que sigue las alternaciones de un campo producidas por la c-a, presenta dificultades para arrancar, puede no funcionar en la dirección adecuada, o bien lo hace en forma irregular ☐ Un motor práctico de c-a tiene un campo magnético rotatorio que lleva consigo la armadura de imán permanente.

☐ La velocidad a la cual gira el campo se llama velocidad síncrona. ☐ Un método sencillo para producir un campo rotatorio es el de dividir en fases, lo cual se puede hacer con c-a monofásica de dos devanados, uno de los cuales produce más corriente inductiva que el otro; o bien, uno de los devanados puede ser alimentado por un capacitor para dar un desplazamiento de fase. ☐ También se pueden usar polos de sombra para originar campos interactuantes que producen la rotación.

☐ También se puede usar potencia de entrada bifásica para energizar dos devanados que hagan girar el campo, o bien aplicarse potencia trifásica a tres devanados para obtener rotación. ☐ Los motores polifásicos de c-a son comunes en aplicaciones industriales. ☐ Con frecuencia, los motores de fase dividida constan de dos devanados sólo para arrancar el motor. Se usa un devanado de arranque con uno de funcionamiento hasta que el motor alcanza una buena velocidad en la dirección correcta. Luego, un interruptor centrífugo desconecta el devanado de arranque.

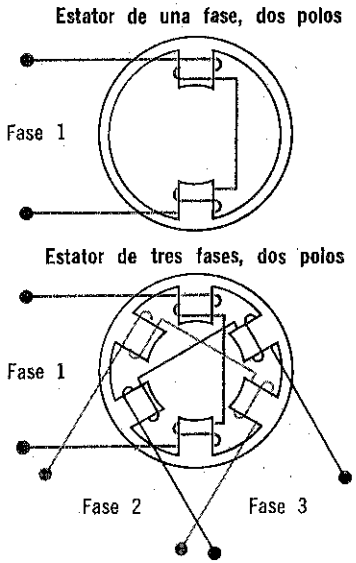
preguntas de repaso

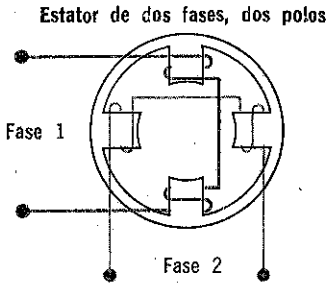
1. En el motor básico de c-a, ¿qué posición ha de tener el rotor para evitar que el motor se ponga en marcha?
2. ¿Por qué el motor básico puede girar en cualquier dirección?
3. ¿Qué clase de campo es necesario para que sea práctico un motor?
4. En el motor de capacitor, uno de los devanados conduce corriente capacitiva y el otro conduce corriente
5. En un motor de fase dividida que no tiene capacitor, ¿qué clase de corriente conduce cada devanado?
6. ¿Por qué es mejor el motor de capacitor que el motor simple de fase dividida y dos devanados?
7. ¿Cuáles son las posiciones relativas de los devanados de campo en los motores de fase dividida y en los bifásicos?
8. ¿Cómo están colocados los devanados de un motor trifásico?
9. ¿Cómo funciona el motor con espira de sombra?
10. ¿Cómo funciona el interruptor centrífugo?

velocidad sincrónica en el estator bipolar

Cuando se estudió el principio del campo magnético rotatorio, se explicó que la velocidad natural de rotación del campo magnético del estator se llama *velocidad síncrona* o velocidad sincrónica.

Como el rotor sigue esta rotación en el campo magnético del estator, es obvio que la velocidad que puede alcanzar el motor estará muy relacionada con la velocidad natural o sincrónica, a la cual gira el campo. A su vez, la velocidad síncrona depende de la frecuencia de la corriente alterna aplicada y del número de polos que tenga el estator.





Los estatores de una fase, dos fases y tres fases cubiertos hasta este punto, se clasifican todos como estatores de dos polos debido a que existe un par de polos N-S principales para cada fase de potencia aplicada. Como resultado, la velocidad sincrónica del campo magnético de todos estos estatores, es la misma

Todos los estatores de motores que se han estudiado hasta ahora se clasifican como estatores de dos polos debido a que, por definición, en cada uno de ellos, los lados opuestos de una bobina de estator que forman un polo norte y un polo sur, o sea un conjunto de dos polos, están a *180 grados físicos* entre sí. En estos motores sólo hay *dos polos principales*. En realidad, los otros sólo son polos auxiliares que sirven para producir un desplazamiento de fase para un campo rotatorio. Además, el campo completa una revolución cada vez que la polaridad de los polos principales tiene una alternación completa. En realidad, se puede determinar el número de polos principales en un motor contando el número de polos efectivos y dividiendo ese número entre el número de fases usadas. Por lo tanto, un motor de cuatro polos y dos fases, en realidad es un motor de dos polos, como también lo será un motor de seis polos y tres fases.

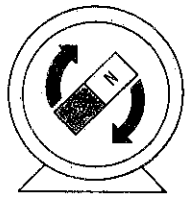
velocidad sincrónica en el estator bipolar (cont.)

Al recorrer un ciclo de c-a, el campo en el plano principal de un motor bipolar se invierte, en efecto, una vez y luego regresa a su estado original, lo cual significa que en el tiempo de un ciclo de c-a, el campo magnético del estator habrá efectuado una revolución completa. Considerando que se aplica una entrada c-a de 60 ciclos por segundo, puede decirse que la velocidad síncrona es de 60 revoluciones por segundo. Como las velocidades de los motores suelen indicarse, en revoluciones por minuto, se multiplicará 60 revoluciones por segundo por 60 segundos de un minuto para obtener 3,600 revoluciones por minuto.

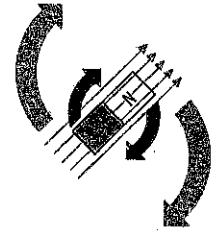
Esto se puede expresar mediante una ecuación general:

$$\text{Velocidad síncrona (rpm)} = \frac{\text{frecuencia c-a (cps)} \times 120}{\text{número de polos/número de fases}}$$

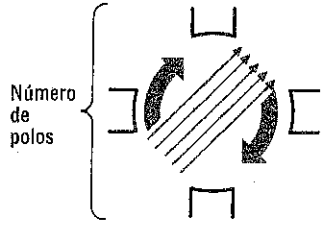
Si se supone que la frecuencia de la c-a aplicada es la misma para todos los estatores de motores de c-a que se han estudiado hasta ahora y se sabe que, por definición se estudiaban estatores de dos polos, cabe concluir que todos sus campos funcionan a la misma velocidad síncrona de 3,600 rpm.



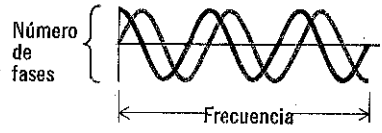
La velocidad que puede alcanzar un motor de c-a depende de la velocidad del rotor



Puesto que el rotor sigue la rotación del campo magnético del estator, su velocidad depende del campo magnético rotatorio



La velocidad natural de rotación del campo, o velocidad síncrona, depende de la frecuencia de la c-a aplicada, el número de fases y el número de polos

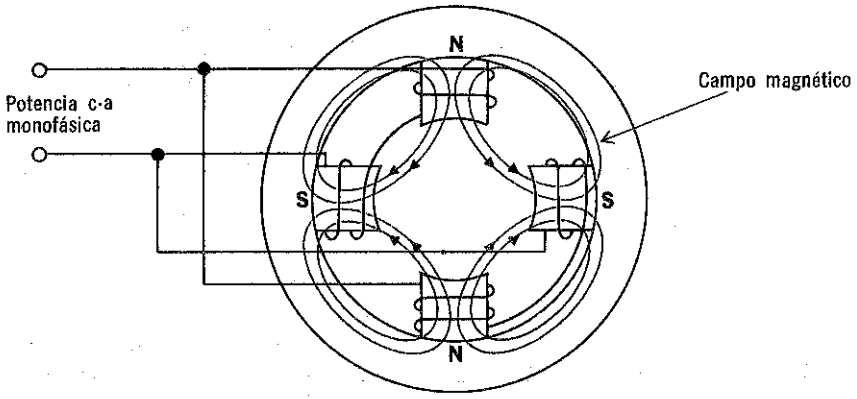


$$\text{Velocidad síncrona} = \frac{\text{frecuencia c-a (cps)} \times 120}{\text{número de polos/número de fases}}$$

velocidad sincrónica en un estator de cuatro polos

Los motores de c-a también pueden hacerse con más de dos polos principales. Cuando se usan más de dos polos principales, los campos pueden intensificarse y hacerse girar más suavemente para obtener un mejor funcionamiento. El estator de cuatro polos está devanado de manera que los lados opuestos de una bobina, que forman un conjunto complementario de polos norte y sur, están separados *90 grados físicos*. Esto significa que los efectos del estator de 4 polos también influyen en los planos existentes entre polos adyacentes.

Los estatores de cuatro polos tienen sus piezas polares complementarias a 90° de distancia



Debido a que las piezas polares complementarias están separadas 90°, el campo magnético rotatorio necesita del doble de tiempo para girar alrededor del estator, de lo que necesita en un estator de dos polos. La velocidad del campo rotatorio en el estator de cuatro polos es, en consecuencia, la mitad de un estator de dos polos

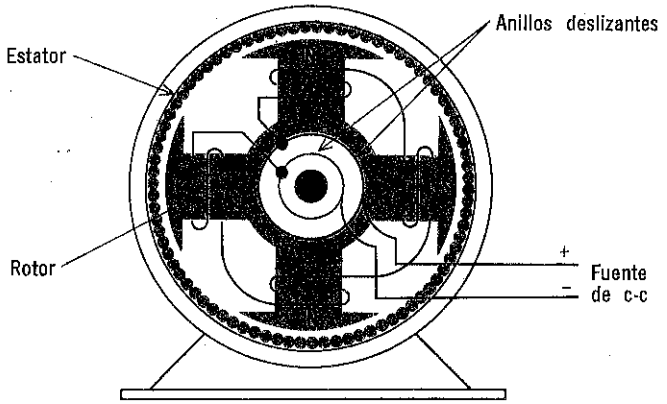
En el estator de dos polos, con cada alternación de c-a, el campo magnético realiza una revolución completa, de 360 grados. Por lo contrario, en el estator de 4 polos, al final de una onda sinusoidal de c-a de 360 grados, el campo gira sólo 180 grados, lo cual significa que en motores con estator de 4 polos, la velocidad síncrona es la mitad de la de un motor de dos polos, o sean 1,800 rpm. Substituyendo la fórmula anterior, se puede demostrar lo siguiente:

$$\text{Velocidad síncrona (rpm)} = \frac{\text{frecuencia c-a (cps)} \times 120}{\text{número de polos/número de fases}}$$

$$188 = \frac{60 \times 120}{4}$$

De la misma manera, es posible calcular la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio de motores con cualquier número de polos principales.

El alternador y el motor síncrono se pueden considerar como opuestos iguales. Son difíciles de distinguir físicamente



El motor síncrono se puede usar como alternador y viceversa. Esto establece un paralelo con el uso de un motor de c-c como generador o del generador como motor

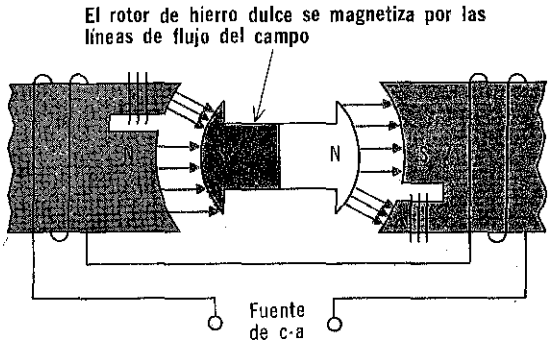
motores síncronos

Según se ha estudiado, es posible que un generador de c-c funcione como motor de c-c y viceversa. Cuando un generador de c-a o alternador es impulsado por energía eléctrica, también produce potencia mecánica. En estas condiciones, el alternador funciona como *motor síncrono.*

El motor síncrono obtiene su nombre de la expresión *velocidad síncrona,* con la cual se ha descrito la velocidad natural del campo magnético rotatorio del estator. En el motor síncrono se produce un campo magnético rotatorio y se usa de manera que reaccione con un campo especialmente originado en el rotor. De hecho, en el efecto de motor que resulta, el rotor se *fija sincrónicamente* con el campo rotatorio del estator y es arrastrado a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio. Según se ha explicado en el estudio del campo magnético rotatorio, la velocidad de rotación está controlada estrictamente por la frecuencia de la potencia de c-a aplicada y el número de polos principales. Como la frecuencia de la potencia la regulan las compañías proveedoras de energía eléctrica, los motores síncronos tienden a mantener su velocidad con un alto grado de precisión. Por esta razón, los motores síncronos tienen aplicaciones importantes en relojes eléctricos y otros dispositivos de control de tiempo.

el motor síncrono básico

En la figura aparece un motor síncrono básico del tipo que puede encontrarse en un reloj eléctrico. Según se notará, el estator incluye polos de sombra para tener la seguridad de que se origine un campo magnético rotatorio. El rotor ilustrado es un trozo de hierro dulce en el cual el campo rotatorio del estator induce magnéticamente polos de polaridad opuesta. Como resultado, se establece una fuerza de atracción magnética entre los polos correspondientes norte y sur del campo rotatorio y los polos inducidos en el rotor, respectivamente. Al girar el campo del estator, el rotor es "arrastrado" a esta velocidad síncrona. Cuando se aplica una carga ligera en el rotor, como por ejemplo las manecillas de un reloj, el rotor puede desincronizarse instantáneamente del campo rotatorio pero volverá a seguir la rotación del campo del rotor, conservando la misma velocidad mientras no haya cambio en la carga.



En el motor síncrono básico, el rotor está fijo en posición por la fuerza atractiva del campo del estator y gira con la velocidad sincrónica correspondiente al campo magnético rotatorio del estator

En un motor simple como el de la figura, la magnitud real de los polos inducidos en el rotor es pequeña y sólo tiene una débil interacción con el campo rotatorio del estator. Como resultado, el motor no produce el par suficiente para ponerse en marcha por sí solo. Los motores de este tipo que se usan en relojes eléctricos, por lo general se ponen en marcha manualmente. De hecho, el usuario aplica un ligero par al rotor para vencer la inercia. Una vez que ha arrancado en esta forma, el motor empieza a producir el par suficiente para mantener su funcionamiento.

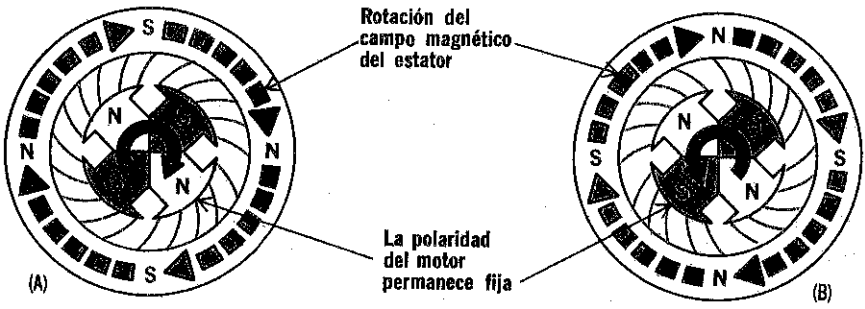
Existen motores síncronos usados en relojes eléctricos y otros dispositivos de control de tiempo y que se ponen en marcha, por sí mismos. Estos motores utilizan los llamados *devanados amortiguadores* en su rotor, con lo cual se produce un aumento efectivo en la inducción magnética entre el estator y el rotor, lo que hace aumentar la interacción estator-rotor en el punto donde se produce suficiente par para poner en marcha el motor.

motor síncrono trifásico

Aunque el motor síncrono y el alternador son opuestos e iguales, el motor síncrono básico en el reloj eléctrico que se acaba de describir casi no tiene ninguna semejanza con el alternador estudiado en el volumen 6. El motor del reloj eléctrico corresponde a una clase especial de *motores síncronos fraccionales,* que funcionan generalmente con potencia monofásica de c-a. En realidad, el motor síncrono que se asemeja al alternador suele ser un motor grande con rotor devanado y anillos deslizantes, similares a los descritos para el alternador. Además, estos motores generalmente funcionan con potencia trifásica.

En el motor síncrono trifásico, se aplica c-a polifásica al estator para producir el campo magnético rotatorio necesario en la forma estudiada anteriormente. Si se suministra entonces c-c como voltaje de excitación al devanado del rotor como en el alternador, se hace evidente que hay una diferencia muy importante entre el motor síncrono básico monofásico de los relojes eléctricos y el motor síncrono trifásico. El rotor de este último origina sus propios polos magnéticos intensos a partir del voltaje separado de excitación continua. Entonces, los polos rotatorios de campo del estator atraen con gran fuerza a los polos del rotor y éste se fija rígidamente a la posición en que gira con sincronismo exacto con el campo rotatorio, o sea, a la velocidad síncrona del motor.

La polaridad del rotor es fija, en tanto que la polaridad del estator alterna al girar. Así pues, al ponerse en marcha, si el rotor se acerca primero a una fuerza de atracción (polo opuesto), tenderá a moverse en una dirección; pero un instante después, se aproximará a una fuerza de repulsión (polo igual) que tiende a impulsarlo en otra dirección. El efecto neto es que el motor síncrono trifásico se mantiene en reposo. Así pues, como en el caso del motor síncrono monofásico básico, el motor síncrono trifásico no produce par cuando se empieza a aplicar potencia y, en consecuencia, no se pone en marcha por sí solo.

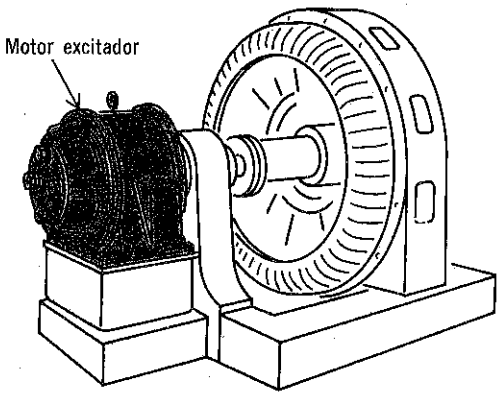


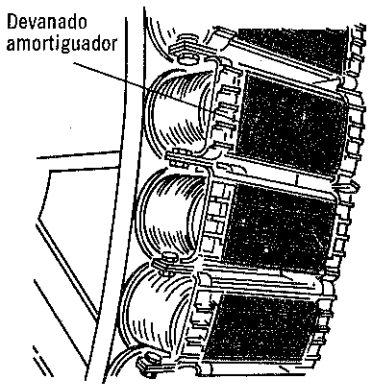
El par de arranque de un motor síncrono trifásico es cero debido a que por cada tendencia del campo magnético rotatorio del estator para arrastrar consigo al rotor, existe una fuerza de atracción que tiende a tirar del rotor en la dirección opuesta

arranque del motor síncrono trifásico

El motor síncrono trifásico no se pone en marcha por sí solo. Por lo tanto, estos motores deben disponer de algún mecanismo de marcha o algún sistema específico en su diseño. En el motor monofásico síncrono de reloj, donde existía el mismo problema, el motor podía ponerse en marcha dándole al rotor un ligero impulso con la mano, o bien instalando devanados amortiguadores en el rotor. En el caso del motor síncrono trifásico, el problema es similar. Naturalmente, como el motor síncrono trifásico es un dispositivo potente y pesado, no es viable ponerlo en marcha a mano. En cambio, se usa un sistema práctico por medio de otro motor, ya sea de c-a o de c-c, para impulsar al rotor del gran motor síncrono hasta aproximadamente 90% de su velocidad síncrona. Entonces, se desconecta el motor de arranque, el rotor queda fijo al campo magnético rotatorio del estator y el motor continúa produciendo par de funcionamiento, de modo que trabaja a la velocidad sincrónica.

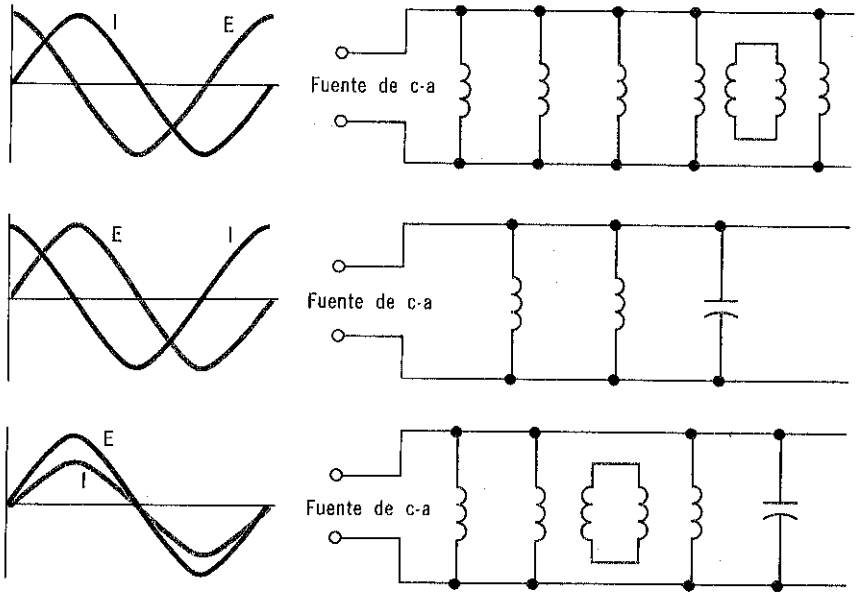
Los motores síncronos con frecuencia se arrancan por medio de un motor excitador especial provisto para ese objeto





Los motores síncronos también se pueden hacer autoarrancables, proveyéndolos de un devanado amortiguador sobre el rotor devanado ordinario

En un segundo sistema de arranque de motores sincrónicos trifásicos se coloca un devanado amortiguador sobre los devanados del rotor. El devanado amortiguador hace posible la marcha inductiva. Este concepto se explicará posteriormente con mayor detenimiento cuando se estudien los motores de inducción. Cuando un motor se pone en marcha por este método, se elimina primero la excitación de c-c. Cuando el motor síncrono se aproxima a la velocidad de funcionamiento, el devanado de c-c es excitado y el rotor se fija al campo magnético rotatorio.



El sistema inductivo formado cuando se usan muchos motores y transformadores en la misma línea, de un factor de potencia pobre. Al agregar capacitancia a la línea en la forma de un motor síncrono sobreexcitado, el factor de potencia se corrige y se cuenta con potencia mecánica además

el motor síncrono usado como capacitor

Una característica muy especial hace útiles a los motores síncronos en aplicaciones industriales que requieren numerosos motores de inducción. Si se alimenta más corriente continua que la que necesita el campo de un motor síncrono, se dice que el motor está *sobreexcitado* y toma una corriente adelantada en fase de la línea de alimentación, igual que lo haría un capacitor conectado a la línea en un circuito resistivo.

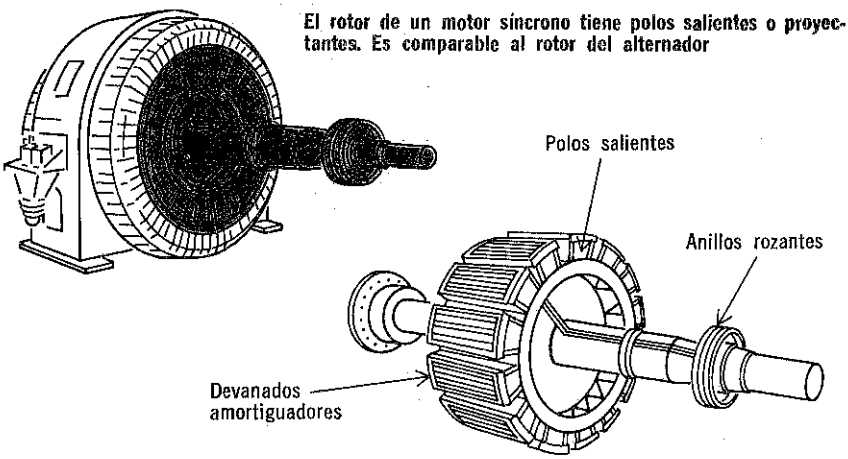
Cuando se usan muchos transformadores y motores de inducción —por ejemplo, en plantas industriales grandes— las corrientes que toman tienden a atrasarse con la tensión impresa, lo cual es común en los circuitos inductivos. Cuanto mayor sea el atraso, más deficiente será el factor de potencia. Así pues, la potencia derivada de las líneas de alimentación no está efectuando el trabajo requerido. Puede mejorarse el factor de potencia aumentando capacitancia a los circuitos de carga. Así se vuelve práctico substituir los motores de inducción en algunas de las maquinarias de plantas con motores síncronos, lo cual ayuda a tener mejor par de potencia, al mismo tiempo que se obtiene potencia mecánica útil. Con frecuencia se dice que cuando se usa un motor síncrono en esta forma, el motor funciona como *capacitor síncrono.*

estructura

Prácticamente no existen diferencias estructurales entre un motor síncrono y un alternador. Por lo tanto, el motor síncrono tendrá un estator y un rotor provisto con un dispositivo de anillos deslizantes y escobillas, lo mismo que el alternador.

La estructura del rotor depende generalmente de lo pesada que sea una carga para el motor y la velocidad a que deba trabajar. La mayor parte de los motores síncronos están construidos para funcionar a velocidades bajas y moderadas. Estos rotores tienen *polos salientes o protuberantes,* devanados sobre núcleos sujetos con pernos a una araña anular de acero fundido, con buenas propiedades magnéticas. Los motores diseñados para dar servicio a velocidad más alta tienen sus núcleos insertados en ranuras de cola de milano y sujetos rígidamente a la araña anular, generalmente hecha de acero laminado. En todos los motores, los anillos de fijación de la araña generalmente son extrapesados, con objeto de que el diseño sea adecuado para vencer la inercia y asegurar que la marcha sea lo más fácil posible.

El rotor de un motor síncrono tiene polos salientes o proyectantes. Es comparable al rotor del alternador



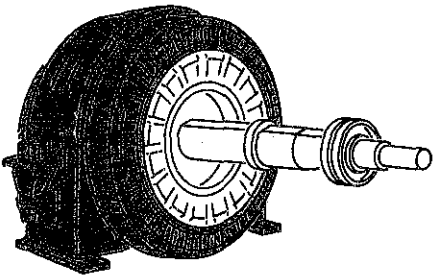
ROTOR

En los motores síncronos con devanados amortiguadores para la marcha, las caras de los polos están ranuradas para alojar las barras de cobre de la estructura amortiguadora. Ambos extremos de las barras alojadas en las ranuras están conectadas en corto circuito, por medio de un anillo conductor.

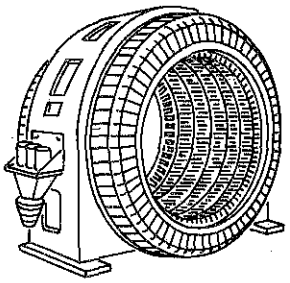
Los devanados del rotor generalmente están hechos de alambre de cobre devanado en cada uno de los núcleos, de manera que el alambre desnudo está expuesto al aire para facilitar el enfriamiento de la estructura. En motores muy grandes, las bobinas están hechas de cintas de cobre, devanadas sobre una arista y asbesto u otro material resistente al calor, o bien se utiliza para aislar cada espira.

estructura (cont.)

El estator de motor síncrono generalmente consta de la cubierta de acero soldado o hierro fundido que sostiene un anillo ranurado de acero dulce laminado. Las laminaciones se aíslan entre sí y las ranuras en ellas se alínean mediante material de fibra córnea. Las bobinas del devanado del estator se alojan en las ranuras alineadas abiertas del anillo de acero. Todas las bobinas están aisladas individualmente y son semejantes e intercambiables. Con este tipo de estructura es fácil quitar e instalar nuevas bobinas cuando se necesitan algunas reparaciones. El estator incluye bloques espaciadores que constituyen un ducto de aire radial de extremo abierto en la estructura a través del cual puede circular el aire de enfriamiento.



ESTATOR



La estructura del estator de un motor síncrono es similar a la del estator del alternador. El estator tiene devanados distribuidos, de manera que sus polos son indistinguibles

Los polos magnéticos en el estator son indistinguibles debido a que no se usan piezas polares, como en el rotor. Téngase presente que las polaridades magnéticas del estator giran para producir un campo rotatorio. Los polos se producen en cualquier instante en las bobinas que conducen la corriente apropiada y, como las fases de corriente difieren en las bobinas, los polos se desplazan de una bobina a otra para seguir la elevación y la caída de la fase de una bobina a otra Así pues, se dice que el estator tiene polos *distribuidos*.

resumen

☐ La velocidad natural a la cual gira el campo magnético de un estator se conoce como velocidad síncrona del motor. ☐ La velocidad síncrona depende de la frecuencia de la potencia aplicada y del número de polos principales en el motor:

$$\text{Velocidad síncrona (rpm)} = \frac{\text{frecuencia c-a (cps)} \times 120}{\text{número de polos/número de fases}}$$

☐ Un motor de dos polos que funciona con potencia a 60 cps tiene una velocidad síncrona de 3,600 rpm. ☐ Un motor de cuatro polos impulsado por potencia a 60 cps tiene una velocidad síncrona de 1,800 rpm. ☐ Un motor de c-a que funciona con el rotor fijo al campo rotatorio de manera que trabaja exactamente a velocidad síncrona.

☐ El reloj eléctrico tiene un motor síncrono con rotor de hierro dulce magnetizado por el flujo del campo de manera que el rotor se enlaza al flujo rotatorio. ☐ Los motores síncronas trifásicas industriales de mayor tamaño consumen corriente continua de excitación para magnetizar el rotor de manera que se produzca mayor atracción magnética y par más alto.

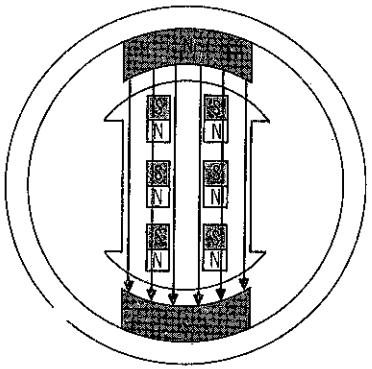
☐ Los motores síncronos no se ponen en marcha por sí mismos naturalmente. ☐ Los motores monofásicos más pequeños pueden ponerse en marcha manualmente, construirse con devanados amortiguadores en su rotor para que se pongan en marcha por sí mismos. ☐ El motor industrial trifásico mayor de tamaño se puede también construir con devanados amortiguadores pero a menudo se usa un motor de c-c auxiliar para impulsar al motor síncrono a su velocidad normal. ☐ Los motores síncronos mayores pueden funcionar como capacitores síncronos para mejorar el factor de potencia de una planta.

preguntas de repaso

1. Definir un *motor síncrono.*
2. El motor trifásico básico tiene seis polos salientes. ¿Cuál será su velocidad síncrona con alimentación de potencia a 60 cps?
3. El motor básico de fase dividida tiene 4 polos protuberantes. ¿A qué velocidad girará con alimentación de potencia a 60 cps?
4. Si un motor síncrono tiene cuatro polos de sombra, ¿a qué velocidad girará su rotor?
5. ¿Por qué el rotor del motor síncrono monofásico simple está hecho de hierro dulce?
6. ¿Por qué se usa corriente para magnetizar los rotores en los motores síncronos más grandes?
7. ¿Cómo se diseñaría un motor síncrono para que se ponga en marcha por sí solo?
8. ¿Cómo puede hacerse que un motor síncrono mejore el factor de potencia de una planta?
9. Un motor síncrono trifásico se asemeja a un _____.
10. ¿Qué son *polos distribuidos*?

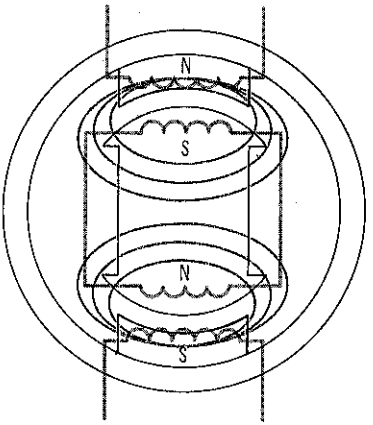
el motor de inducción

Al estudiar el motor básico monofásico síncrono del reloj, se explicó que el rotor se magnetiza debido a la inducción magnética de los polos de campo. Esto se ha estudiado en el volumen 1. Un imán temporal débil, colocado en un flujo magnético, tiene sus moléculas orientadas de manera que el metal se magnetiza.



Los motores síncronos usan la inducción magnética para magnetizar sus rotores

Las líneas del flujo del campo orientan a las moléculas magnéticas en el rotor de hierro dulce



Los motores de inducción usan la inducción electromagnética para magnetizar sus rotores

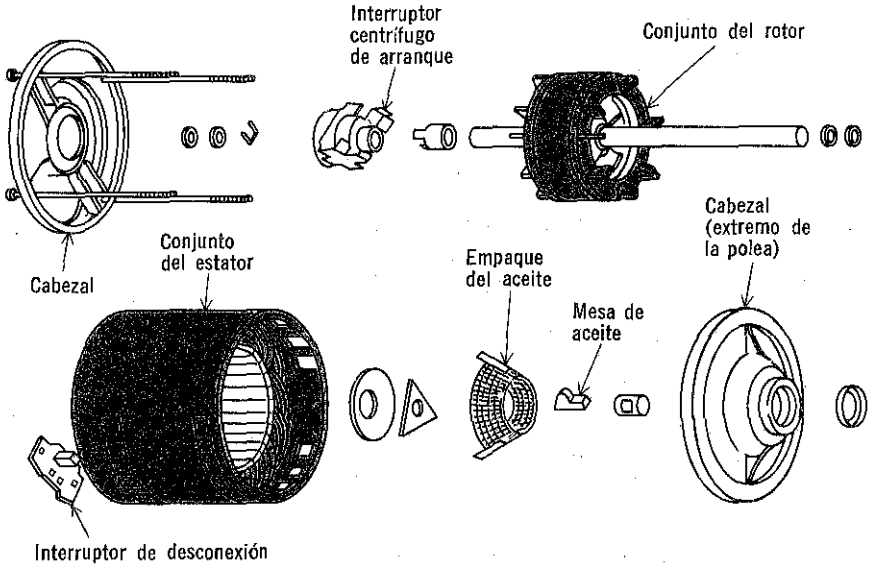
El estator actúa como el devanado primario de un transformador y el rotor actúa como el secundario

El motor de inducción es similar al motor síncrono en el sentido de que depende del campo magnético para funcionar. Sin embargo, ésta es toda la semejanza. El motor de inducción no depende de la inducción magnética, sino que funciona a base de *inducción electromagnética*. El estator y el rotor hacen las veces de los devanados primario y secundario de un transformador. El campo magnético rotatorio del estator induce corrientes elevadas en el rotor y éstas a su vez producen sus propios campos magnéticos, que interactúan con el campo principal para hacer girar al rotor.

Como el motor síncrono simple funciona por inducción magnética, el campo del rotor es débil. Pero, debido a que el motor de inducción funciona por inducción electromagnética, el campo del rotor es intenso. Por lo tanto, el motor de inducción puede ponerse en marcha por sí solo y producir suficiente par sin anillos deslizantes, conmutadores o escobillas. La única potencia alimentada al rotor es producida por la inducción electromagnética procedente del estator.

estructura

En el motor de inducción, como en el síncrono, la parte estacionaria recibe el nombre de *estator* y la parte rotatoria se llama *rotor*. El estator de los motores de inducción es la única parte a la cual se aplica potencia. Los diversos estatores que se han estudiado al analizar la producción de un campo magnético rotatorio, se usan también en los motores de inducción. En efecto, los motores de inducción suelen recibir su nombre según la forma en que se origina el campo magnético rotatorio del estator. Por lo tanto, se oye hablar de *motores de espira de sombra, fase dividida, arranque por capacitor, y polifásicos de inducción.*

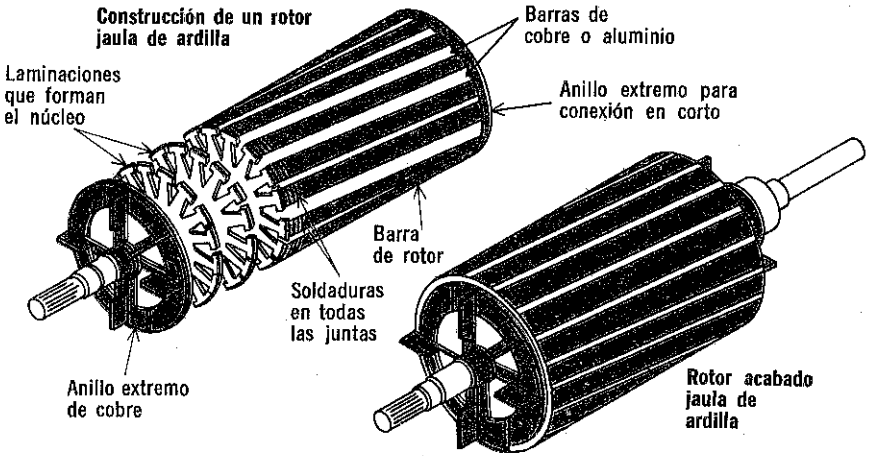


En el motor de inducción c-a, generalmente no se tienen conexiones eléctricas al rotor por medio de carbones como en los motores síncronos y c-c. Por lo tanto, este motor da servicios más prolongados sin problemas y es el motor c-c que más se usa

Aunque se han estudiado los estatores de dos polos, cuatro polos, etc., no siempre es fácil contar los polos de un motor. En lugar de los polos fácilmente distinguibles *salientes* (protuberantes) que se mencionaron para ilustrar los estatores, muchos motores de inducción tienen en su estator *devanados distribuidos* similares al tipo descrito para motores síncronos, lo cual significa que si se observan los devanados del estator de algunos motores de inducción, no se podrán contar los polos. Es necesario pues, confiar en los datos del fabricante, impresos en la placa del motor, para obtener esta información.

estructura (cont.)

El rotor más simple y que se usa más en los motores de inducción es el llamado *rotor de jaula de ardilla,* al cual debe su nombre el *motor de inducción de jaula de ardilla.* El rotor de jaula de ardilla consta de un núcleo de hierro laminado y ranurado longitudinalmente en toda su periferia. En estas ranuras se colocan conductores sólidos de cobre, aluminio u otro material, los cuales se ajustan a presión. En ambos extremos del rotor se observan anillos de corto circuito soldados o unidos a las barras para formar una estructura sólida. Las barras de corto circuito, debido a su muy baja resistencia respecto al núcleo, no necesitan estar especialmente aisladas de él. En algunos rotores, las barras y anillos extremos están fundidos como una estructura integral única que se coloca en el núcleo. En realidad, los elementos en corto circuito constituyen *espiras de corto circuito,* por las cuales circulan altas corrientes producidas por el flujo del campo.



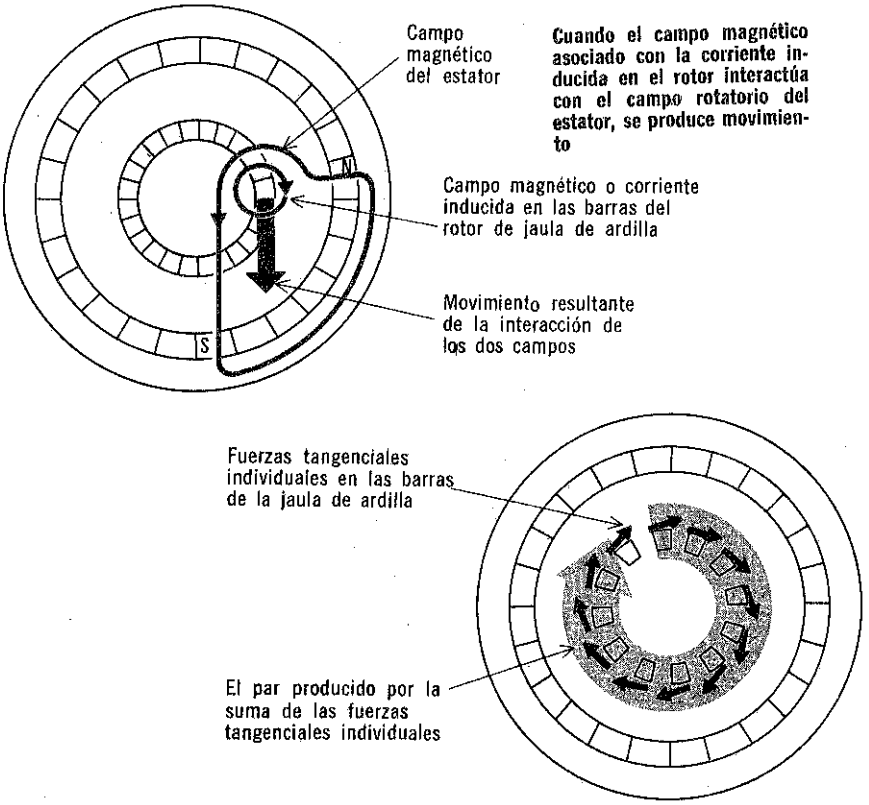
El rotor jaula de ardilla usado en los motores de inducción c-a es extremadamente simple en construcción cuando se compara, por ejemplo, con la armadura de un motor c-c, con todas sus disposiciones y complicaciones de devanado

En comparación con el rotor de devanado complicado de motor síncrono o la armadura del motor de c-c, el rotor de jaula de ardilla es relativamente sencillo. Es fácil de fabricar y prácticamente no ocasiona problemas de servicio.

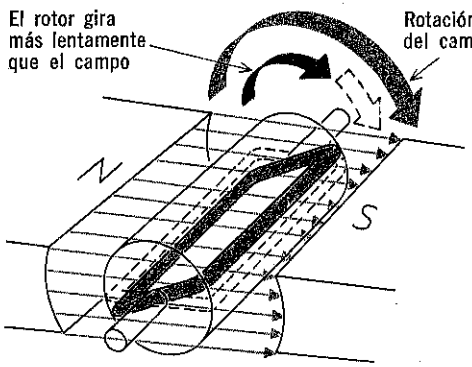
En un motor de inducción jaula de ardilla ya armado, la periferia del rotor está separada del estator por un entrehierro muy pequeño. En efecto, la anchura del entrehierro no es mayor que lo necesario para permitir el movimiento del rotor. Con esto se asegura que se obtendrá la inducción electromagnética más intensa posible.

funcionamiento

Se ha estudiado cómo se puede producir un campo magnético rotatorio en un estator y se sabe ya algo acerca del rotor de jaula de ardilla. Por lo tanto, ya se puede estudiar el funcionamiento básico del motor de inducción.



Cuando se aplica potencia al estator de un motor práctico de inducción, se origina un campo magnético rotatorio por cualquiera de los medios que se han estudiado. Al empezar la rotación del campo, las líneas de flujo cortan las espiras en corto circuito, las cuales están incrustadas alrededor de la superficie cilíndrica del rotor de jaula de ardilla y genera voltajes en ellas por inducción electromagnética. Debido a que estas espiras son cortos circuitos con resistencia muy baja, los voltajes inducidos hacen circular altas corrientes en las barras del rotor. Entonces, las corrientes circulantes en el rotor producen sus propios campos magnéticos intensos. Estos campos locales de flujo de rotor producen sus propios polos magnéticos, que serán atraídos al campo rotatorio. Así pues, el rotor gira siguiendo al campo principal.



Para que el motor de inducción trabaje, el rotor debe deslizarse y girar a una velocidad ligeramente menor que la del campo rotatorio. Si no tuviese deslizamiento y girara en la misma velocidad que el campo, no cortaría líneas de flujo, no habría inducción y el rotor perdería su flujo. Si esto sucediera, el rotor tendería a girar más lentamente para producir el deslizamiento necesario para trabajar

fem inducida cuando el conductor corta líneas de fuerza

$$\text{Porciento de deslizamiento} = \frac{(\text{Velocidad síncrona} - \text{velocidad de operación}) \times 100}{\text{velocidad síncrona}}$$

deslizamiento

Ya se ha explicado cómo, por medio de la inducción, el movimiento rotatorio, producido eléctricamente, del campo magnético del estator ha originado la rotación mecánica del rotor, la cual sigue la misma dirección que el campo del estator. Si no existiera carga en el motor, ni fricción o resistencia al movimiento, cabría pensar que la velocidad del motor ascendería a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio. Sin embargo, si el rotor girara exactamente a esa velocidad, no existiría diferencia relativa de movimiento entre campo y rotor, las barras de cobre en el rotor no cortarían el flujo del campo y tampoco habría corriente inducida en el rotor. Sin inducción, el rotor perdería su propio campo magnético y no se produciría par.

Para que el motor de inducción funcione, el rotor deberá girar a una velocidad diferente de la del campo rotatorio del estator. En realidad, la velocidad del rotor es ligeramente menor que la rotación del campo del estator. Esta diferencia se conoce como *deslizamiento*. En los motores prácticos, los rotores funcionan a una velocidad de 2 a 10% menor que la velocidad síncrona sin carga; al aumentar la carga, el porcentaje de deslizamiento aumenta.

En un motor de 4 polos con velocidad síncrona de 1,800 rpm, si el rotor gira efectivamente a 1,764 rpm, según lo mide un tacómetro, existe una diferencia de 36 rpm entre la velocidad síncrona y la del rotor. Expresada en porcentaje, sería $36/1{,}800 \times 100$, lo cual indica un deslizamiento de 2%. En un motor de dos polos con una diferencia de 36 rpm, el deslizamiento sería menor debido a que, según se recordará, a 60 cps la velocidad síncrona del motor de dos polos es 3,600 rpm; substituyendo en la fórmula:

$$\frac{3{,}600}{36} \times 100 = 1\% \text{ deslizamiento.}$$

par de arranque

El par de arranque del motor de inducción jaula de ardilla es bajo, debido a que, en reposo, el rotor tiene una reactancia inductiva relativamente elevada (X_L) con respecto a su resistencia (R). En estas condiciones, cabría esperar que la corriente del rotor estuviera 90 grados atrasada con respecto a la tensión del rotor. Así, se dice que el factor de potencia en el circuito es bajo, lo cual significa que el motor es ineficiente como carga y no puede convertir la potencia recibida de la fuente en energía realmente útil para su funcionamiento.

A pesar de esa ineficiencia, se produce una fuerza de par y el motor comienza a girar. Al comenzar su rotación, la diferencia de velocidad entre el rotor y el campo rotatorio o deslizamiento, varía desde un máximo de 100 por ciento a algún valor intermedio, por ejemplo 50 por ciento. Al disminuir el deslizamiento de esta manera, la frecuencia del voltaje inducido en el rotor disminuye, debido a que el campo rotatorio corta conductores a velocidad reducida, lo cual, a su vez, hace que disminuya la reactancia inductiva total del circuito. Al disminuir la reactancia inductiva, el factor de potencia comienza a aumentar y se nota que el motor aprovecha mejor la potencia que se le suministra. Esto redunda en un aumento del par y el consiguiente incremento en la velocidad.

La velocidad del motor se estabiliza cuando el deslizamiento disminuye hasta algún valor que esté entre 2 y 10 por ciento. Para dicha estabilización concurren dos factores: por un lado, el motor tiende a aumentar su velocidad cuando el deslizamiento desciende por debajo del 2 por ciento; por el otro, cuando la velocidad del rotor se aproxima al 2 por ciento de la velocidad síncrona, disminuyen los efectos de la inducción y, esto contrarresta la anterior tendencia al aumento del par, la cual ocurre mientras el motor se va acelerando a partir del momento en que se pone en marcha. Así pues, en el motor de c-a hay un control automático de velocidad que tiene características semejantes al de los motores de derivación de c-c.

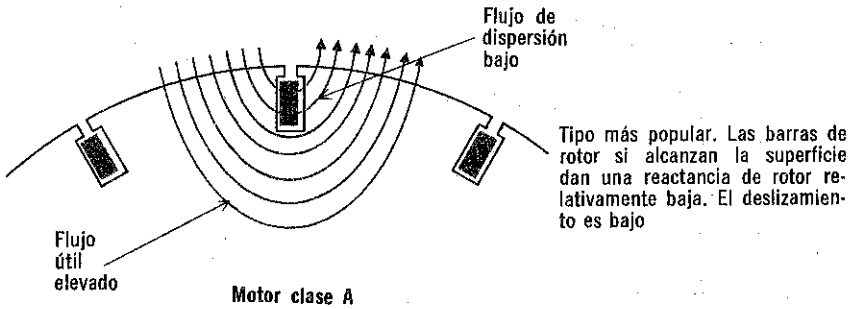
CLASES DE MOTORES DE JAULA DE ARDILLA
(Según sus características de arranque)

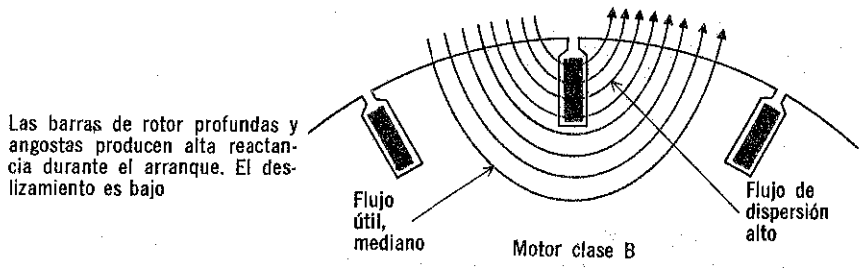
Clase	Característica de arranque
A	Par moderado, corriente de arranque moderada
B	Par moderado, baja corriente de arranque
C	Par alto, baja corriente de arranque
D	Alto deslizamiento
E	Par bajo de arranque, corriente de arranque moderada
F	Par bajo de arranque, baja corriente de arranque.

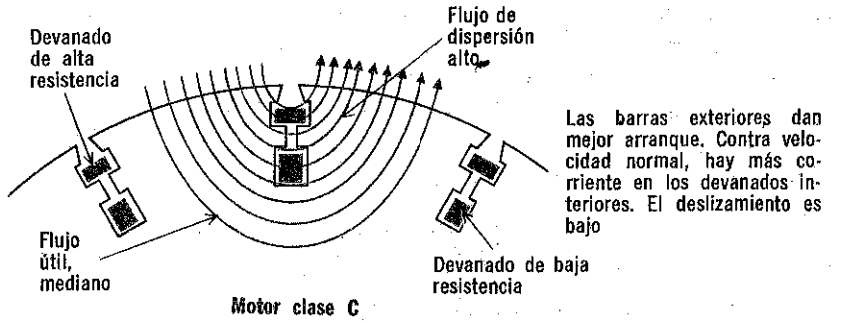
par a velocidad de funcionamiento

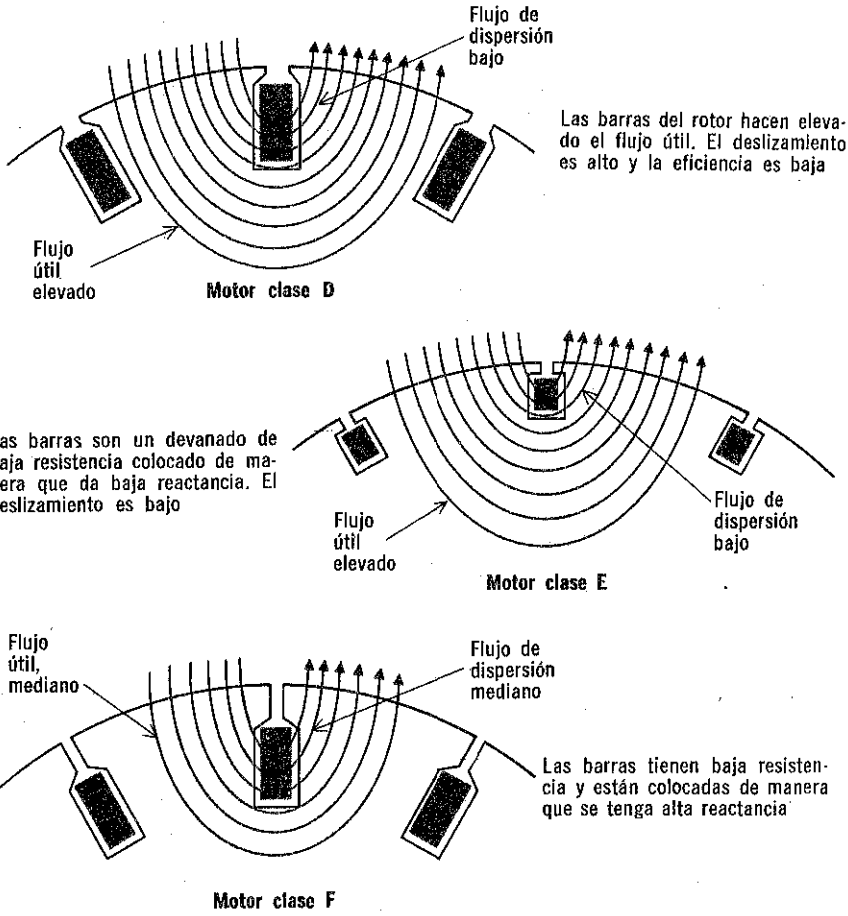
Se ha estudiado que después de alguna dificultad para poner en marcha el motor, debido a una mala característica del par de arranque, al rotor de un motor de inducción alcanzará finalmente una velocidad estable cuando hay entre un 2 y un 10 por ciento de deslizamiento. Esta es la velocidad de funcionamiento del motor sin carga. A esta velocidad del motor sin carga se requiere muy poco par para mantener el motor funcionando.

Si se aplica una carga al motor en funcionamiento, el rotor pierde velocidad y el deslizamiento aumenta. Como resultado, el campo rotatorio corta los anillos de cobre a mayor velocidad, induciendo corrientes más altas en el rotor para obtener un par mayor, de manera que el motor pueda impulsar la carga.





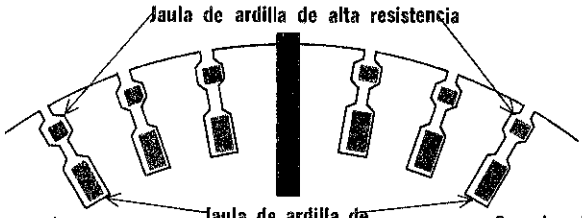




par a velocidad de funcionamiento (cont.)

Si la carga del motor aumenta del punto donde el deslizamiento aumenta y, en consecuencia, disminuye la velocidad, se presenta una inversión en las condiciones para poner en marcha el motor. Es decir, al disminuir la velocidad del rotor, también disminuye el par, bajando el factor de potencia, de manera que se contrarresta la tendencia de la inducción a aumentar el par. Agotada así la fuerza de par, el motor queda en reposo, o sea que es detenido por la carga. En estas condiciones se dice que se ha alcanzado el par de bloqueo del motor.

motor de inducción de doble jaula de ardilla



Cuando se aplica corriente, la jaula de alta resistencia lleva la mayor parte de la corriente inducida en el rotor, dando un alto par de arranque con baja corriente de arranque

Cuando el motor ha alcanzado la velocidad de operación, la corriente en la jaula de ardilla interior de baja resistencia es mucho más alta que la de la jaula exterior de alta resistencia con lo que se tiene operación en alta eficiencia

El rotor de doble jaula de ardilla da el par de arranque más alto en comparación con el rotor de jaula de ardilla convencional. Las barras de alta resistencia de rotor hacen esto posible. Es difícil distinguir entre los rotores de jaula de ardilla, ya que las diferencias de construcción son internas

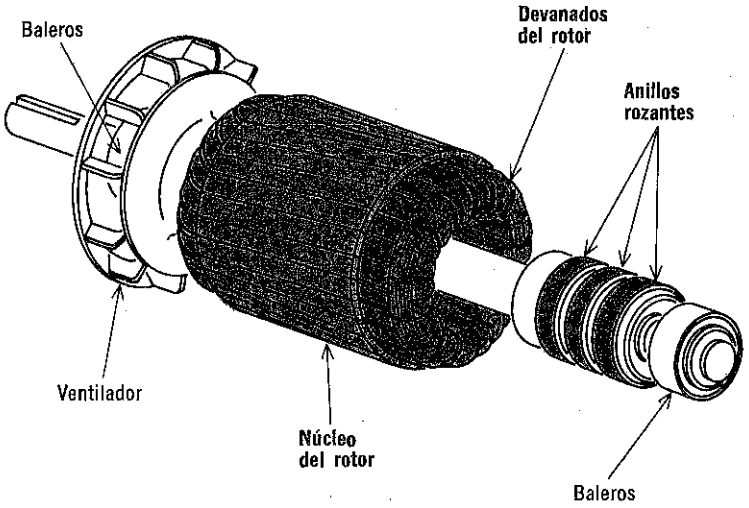
La característica de un par de arranque deficiente para el motor de inducción ordinario de jaula de ardilla, lo cual se debe a su reactancia inductiva que es relativamente elevada en reposo, en comparación con su resistencia. Como los rotores se diseñan específicamente para que tengan determinadas propiedades de inductancia y resistencia, y no se las puede cambiar para diferentes aplicaciones, el motor de jaula de ardilla ordinario se usa solamente para cargas que requieren par variable a velocidad aproximadamente constante y con alta eficiencia a plena carga, como en el caso de ventiladores, bombas centrífugas y motogeneradores.

Para obtener un alto par de arranque se necesita un rotor especial de alta resistencia, el cual tiene dos juegos de barras de rotor. Un juego de barras de baja resistencia está insertado en lo más profundo de las ranuras del núcleo. El segundo, de alta resistencia, también está insertado en las ranuras del núcleo, pero más cerca de la superficie del rotor. Al ponerse en marcha el motor, la mayor parte de la corriente fluye a través de las barras de alta resistencia, debido a que en ese momento la reactancia inductiva de las barras de baja resistencia es más alta que la rectancia de las barras de alta resistencia. Como el factor de potencia es mejor en el circuito de alta resistencia, el par de arranque mejora con respecto al del motor ordinario. Cuando el motor alcanza la velocidad de funcionamiento, la mayor parte de la corriente circula en las barras más profundas, debido a que las reactancias inductivas se igualan y el valor óhmico es el único factor de control.

Cuando funciona sin carga, el motor de doble jaula de ardilla es indistinguible del motor ordinario de jaula de ardilla. Sin embargo, cuando trabaja con cargas variables, la corriente se divide automáticamente entre los juegos de barras, en las proporciones adecuadas para producir la cantidad necesaria de par para la condición dada de la carga.

motor de inducción de rotor devanado

Hasta este punto, en el estudio de motores de inducción de c-a, solamente se han considerado motores con rotores de jaula de ardilla. También es factible construir un motor de inducción de c-a con devanados alrededor del núcleo del rotor, en lugar de las barras conductoras del motor jaula de ardilla. En este caso, las corrientes se inducen en el devanado tal como ocurre cuando se trata de espiras conectadas en corto. Sin embargo, la ventaja de usar devanados es que las terminales de éstos pueden sacarse a través de anillos deslizantes, de manera que pueda controlarse la resistencia y, en consecuencia, la corriente que fluye en los devanados. El llamado *rotor* devanado en molde tiene la misma apariencia básica que la armadura devanada de un motor de c-c.



El rotor devanado generalmente se usa en motores de inducción grandes que se operan de una fuente de c-a trifásica

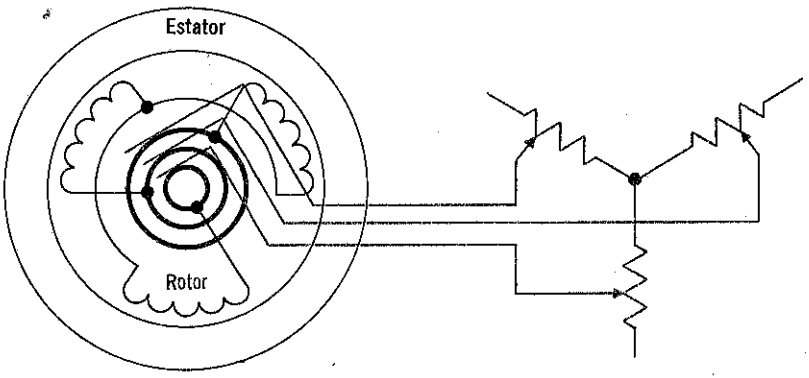
En general, el motor de inducción de jaula de ardilla sirve para cualquier aplicación. Lo que el motor ordinario de jaula de ardilla no puede hacer debido a requisitos de par de arranque, puede lograrse en forma adecuada con el motor de doble jaula de ardilla. De hecho, en aplicaciones en que se usa potencia monofásica de c-a, la familia de motores de c-a de jaula de ardilla se usa casi exclusivamente. El motor de inducción de rotor devanado sólo tiene aplicaciones especiales y siempre funciona con potencia trifásica de c-a.

motor de inducción de rotor devanado (cont.)

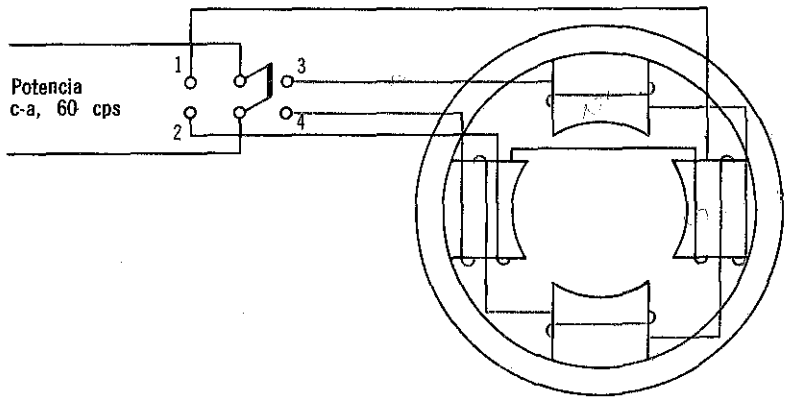
Las tres terminales de los devanados del rotor trifásicos salen hasta tres anillos deslizantes montados sobre el eje del rotor. Las escobillas que se deslizan en los anillos son importantes para obtener la máxima ventaja del motor de rotor devanado. Si las escobillas se conectan a través de reóstatos, es posible entonces producir un par de arranque más elevado de lo que es posible con motores de jaula de ardilla, ya sea sencilla o doble. Al momento de arrancar, toda la resistencia de los reóstatos está en contacto con el circuito del rotor y, así se produce el máximo par factible, ya que se seleccionan valores de resistencia, iguales o mayores que la resistencia del rotor en reposo.

Al aproximarse el motor a la velocidad normal de funcionamiento, la resistencia del reóstato se reduce gradualmente hasta quedar totalmente desconectada del circuito a velocidad plena. Irónicamente, aunque su par de arranque es mejor, no es tan eficiente como el de los motores de jaula de ardilla a plena velocidad, debido a la inherente resistencia del devanado del rotor, la cual siempre será mayor que la de un rotor de jaula de ardilla.

Una característica especial, obvia en el motor de rotor devanado, es su capacidad de velocidad variable. Al variar la resistencia del reóstato, también es posible variar el porcentaje de deslizamiento y, en consecuencia, la velocidad del motor. En estos casos, el funcionamiento a velocidad inferior a la normal significa que el motor funciona con eficiencia y capacidad reducidas. Además, debido a la alta resistencia del rotor, es más fácil que varíe la velocidad del motor cuando haya cambios de carga.



El motor de rotor devanado difiere de otros motores de inducción en que usa una resistencia en serie con sus devanados de rotor a través de un dispositivo de anillos rozantes y carbones



En este motor de devanado múltiple, si se conectan los alambres 1 y 2 a la fuente de potencia, es un motor de dos polos que opera aproximadamente a 3600 rpm. Pero si se conectan los conductores 3 y 4, se convierte en un motor de cuatro polos que opera aproximadamente a 1800 rpm.

motores de inducción de jaula de ardilla de velocidad múltiple

Aunque el motor de rotor devanado de velocidad variable se limita a aplicaciones trifásicas por las razones descritas, cabe preguntar cómo se puede obtener más de una velocidad con un motor de inducción de jaula de ardilla. Por ejemplo, ¿cómo se obtienen varias velocidades en aparatos domésticos tales como un ventilador o una batidora de velocidad múltiple, que están provistos de un motor de jaula de ardilla?

Se ha explicado que la velocidad de un motor de inducción depende de la frecuencia que tenga la corriente de alimentación y del número de pares de polos que se usan en el motor. Es obvio que para alterar la velocidad del motor basta con cambiar uno de estos dos factores. El método más común es el de cambiar el número de polos, generalmente por medio de algún tipo de control externo. Actualmente se usan dos tipos de motores de inducción de jaula de ardilla con velocidad múltiple: el de devanado múltiple y el de polos consecuentes. Ambos están dotados de polos que se pueden cambiar según lo requieran las conexiones externas del interruptor de cambio y, de esta manera, hacen posible que el motor funcione con un número limitado de velocidades diferentes.

En el motor de devanado polar múltiple distribuido, se colocan dos o más devanados separados en las ranuras del núcleo del estator, uno sobre el otro. Por ejemplo, puede alojarse un devanado de ocho polos en las ranuras del núcleo y otro de cuatro polos encima de él. Por supuesto, los devanados están aislados entre sí y dispuestos de manera que sólo un devanado puede trabajar a la vez.

resumen

☐ El estator y el rotor de un motor de inducción hacen las veces de devanados de un transformador. El campo rotatorio del estator induce corriente en el rotor para producir el campo magnético del rotor. ☐ El estator del motor de inducción puede producir un campo rotatorio por cualquier método usado en el motor de c-a básico. ☐ Sin embargo, el rotor de los motores de inducción está diseñado para obtener una inducción electromagnética eficiente. ☐ El rotor de jaula de ardilla, de uso muy común, tiene barras conductoras sólidas conectadas de manera que forman espiras en corto circuito para transmitir corrientes inducidas elevadas.

☐ Como el motor de inducción funciona a base de inducción electromagnética, su rotor no puede operar a la velocidad síncrona; así pues, debe deslizarse para cortar líneas de campo de su fuerza. ☐ El motor de inducción generalmente tiene deslizamientos del 2 al 10 por ciento con respecto a la velocidad síncrona.

☐ El motor de inducción ordinario tiene un par de marcha deficiente. Pero puede mejorarse usando un rotor de doble jaula de ardilla. ☐ Algunos motores de inducción trifásicos especiales tienen rotores devanados con un conjunto de escobillas y anillos rozantes, de manera que se puede añadir resistencia para controlar la corriente del rotor y aumentar el par de marcha e incluso el deslizamiento, para controlar la velocidad. ☐ Los motores de velocidad múltiple se pueden fabricar con estatores de polos múltiples seleccionables o de polos consecuentes.

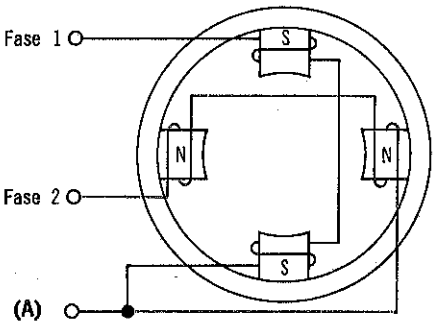
preguntas de repaso

1. Los rotores de los motores síncronos se magnetizan por medio de inducción _____.
2. Los rotores de los motores de inducción se magnetizan por medio de inducción _____.
3. Compare las velocidades de un motor de inducción y de un motor síncrono de diseño similar.
4. ¿Cuál es la ecuación correspondiente al deslizamiento?
5. ¿Cuánto difieren los devanados de un estator en un motor de inducción y en un motor síncrono?
6. ¿Por qué un rotor de jaula de ardilla tiene espiras en corto?
7. ¿Con qué rapidez girará un motor monofásico de inducción de cuatro polos si su deslizamiento es del 5 por ciento?
8. ¿Qué clases de motores de inducción pueden tener buen par de marcha?
9. ¿Qué es *par de bloqueo*?
10. ¿Qué clase de estatores puede tener un motor para dar velocidades múltiples?

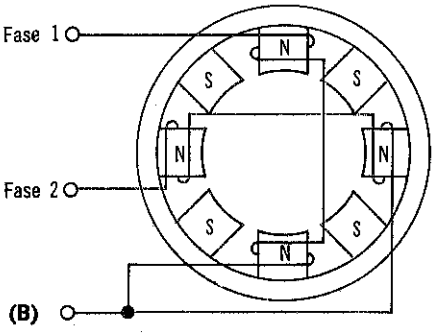
motor de polo subsecuente

En el motor de polos consecuentes se tienen, por ejemplo, dos velocidades, estando el motor dispuesto de modo que tenga cierto número de polos para operación en alta velocidad y luego, por acción de un interruptor, duplicar este número de polos para obtener funcionamiento a baja velocidad. La acción de interruptor se ilustra aquí como ocurre en un motor bifásico, para simplificar la explicación. Si se recorre el alambrado en A, es fácil apreciar que el sistema, está dispuesto de manera que se produzcan polos magnéticos tanto norte como sur en las proyecciones de los devanados que se indican. Al aplicar potencia bifásica al sistema de cuatro polos, se obtiene un campo rotatorio a 360 rpm.

Los polos consecuentes obtienen su nombre del hecho de que se forman como consecuencia directa de la formación de polos norte "monopolares"



La combinación de polos consecuentes y monopolos efectivos da el doble del número de polos reales que se puedan contar. Al duplicar el numero de polos, se reduce la velocidad del motor a la mitad

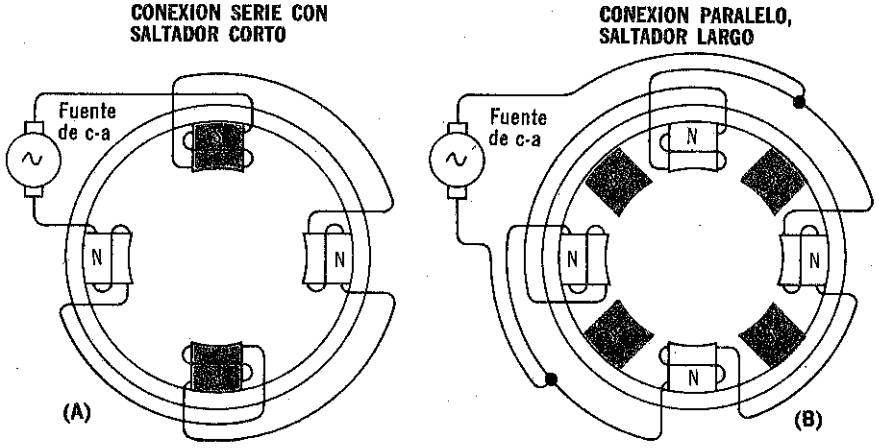


En B se han cambiado las conexiones de manera que el sistema queda dispuesto de manera que produzca cuatro polos norte magnéticos en las protuberancias del devanado. Puesto que para cada polo norte debe existir un polo sur, los polos sur —conocidos como *polos consecuentes* debido a que son consecuencia de los polos norte, formados originalmente—, se producen entre los polos norte salientes, según se indica. Esto significa que en B, existe el doble de grupos polares que en A. Por lo tanto, se obtiene un campo magnético rotatorio de 8 polos, a 1,800 rpm.

motor monofásico de polo consecuente

Ya se ha explicado cómo automáticamente se forma un polo opuesto, como consecuencia del origen de un monopolo aparente. Aunque se ha puesto como ejemplo un motor bifásico el sistema de polos consecuentes se usa más frecuentemente en los motores de inducción monofásicos.

La parte A de la ilustración representa lo que se llamará el *dispositivo saltador en corto* del motor. En éste, todos los devanados están en serie y se producen polos alternos, norte y sur. Para producir polos consecuentes, se substituye la conexión en serie que aparece en A, con una conexión en paralelo, lograda por el *dispositivo saltador largo* ilustrado en B. Si se conecta el motor en esta forma, se producen cuatro monopolos salientes y, como resultado, se originan cuatro polos consecuentes opuestos. En el motor práctico de polos consecuentes, todos los dispositivos de conexión interna necesarios se reúnen en un tablero de control externo.

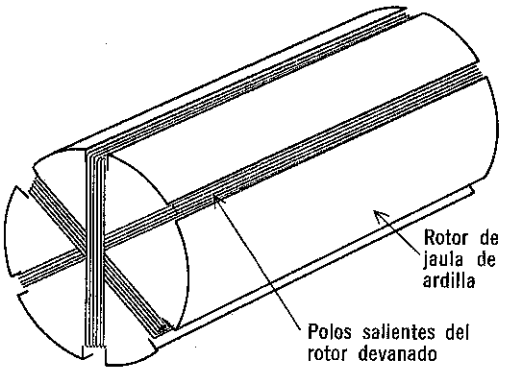


En este motor monofásico de polos consecuentes, se usan métodos de interconexión de grupos de polo-fase serie y paralelo. Los complicados rearreglos de devanados se controlan de un tablero externo al cual se llevan todas las puntas del motor

Las características del motor de polos consecuentes dependen de su aplicación prevista. En el *motor de potencia constante*, el par varía en relación inversa con la velocidad. Sirve para hacer funcionar máquinas-herramientas, tornos, etc. En el motor de par constante, la capacidad varía en relación directa con la velocidad. Sirve para mover bombas, compresoras de aire y ventiladores de presión constante. En el *motor de par variable y potencia variable*. tanto el par como la potencia *aumentan* al aumentar la velocidad. Este tipo de motor se encuentra en ventiladores y acondicionadores de aire domésticos.

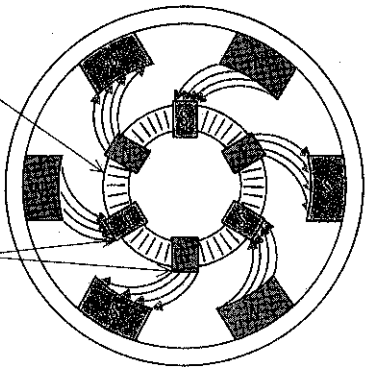
motor de reluctancia

El motor de reluctancia es un motor síncrono de potencia fraccionaria que tiene un tipo especial de rotor magnético de jaula de ardilla. En el motor de reluctancia, se hacen ranuras especiales en un rotor de jaula de ardilla, que por lo demás, es del tipo común. Estas ranuras sirven entonces para devanar polos salientes de *hierro dulce* que corresponden al número de polos en el estator. En cierto modo, esta disposición es inversa a la de un rotor devanado con una jaula de ardilla que sirve como devanado amortiguador de marcha, encima.



El rotor del motor de reluctancia es el opuesto del rotor devanado con un devanado amortiguador

Consiste de un rotor de jaula de ardilla, polos de hierro dulce especiales, sobrepuestos. El motor arranca como motor de inducción y, finalmente, funciona como motor síncrono



Cuando el rotor adquiere velocidad, las barras de reluctancia de hierro dulce se magnetizan por los polos de campo y el rotor se fija en sincronismo con el campo rotatorio. Puesto que no hay deslizamiento, las barras de la jaula de ardilla no trabajan

El motor de reluctancia se pone en marcha del mismo modo que un motor de inducción de jaula de ardilla. Al alcanzar la velocidad sincrónica el motor de reluctancia, los polos de hierro dulce del rotor se deslizan cada vez menos. En algún momento del funcionamiento, la diferencia relativa de velocidad entre el campo magnético rotatorio y el rotor es suficientemente baja para hacer que los polos del rotor sean magnetizados por los polos del estator. Luego, el rotor se une con el campo rotatorio. En este punto, el rotor tiende a funcionar como un motor síncrono a velocidad síncrona.

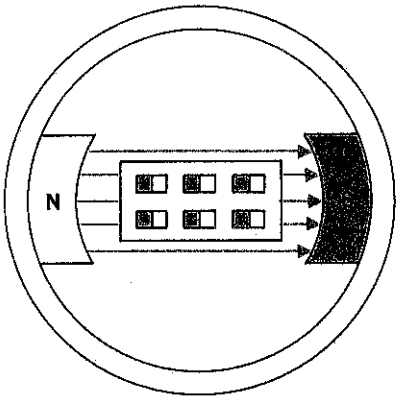
motor de histéresis

El *motor de histéresis* es una forma especial de motor síncrono donde las propiedades magnéticas del material usado en el rotor sirven para producir un gran par y lograr acción síncrona sin necesidad de una excitación externa de c-c.

De lo estudiado sobre magnetismo, se recordará que, cuando una barra de hierro se coloca en un campo magnético, las moléculas del hierro, se disponen en una forma ordenada. Al hacerlo, la barra de hierro se convierte en un imán. El polo norte de la barra señala hacia el polo sur del campo y el polo sur señala hacia el polo norte del campo.

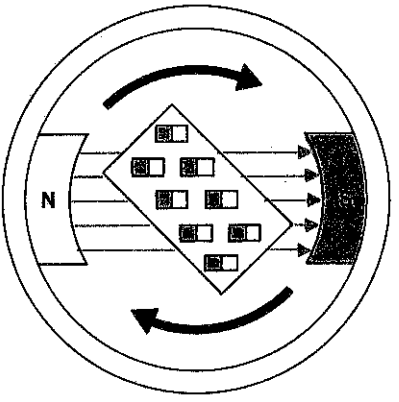
Si se hace que esta barra gire en el campo en el mismo sentido que las manecillas del reloj, cada molécula de la barra permanece en su posición original, alineada con el campo magnético externo. En otras palabras, las moléculas mismas han girado en sentido inverso al de las manecillas del reloj con respecto a la posición física de la barra. Este cambio de la posición de las moléculas respecto a la posición de la barra consume potencia.

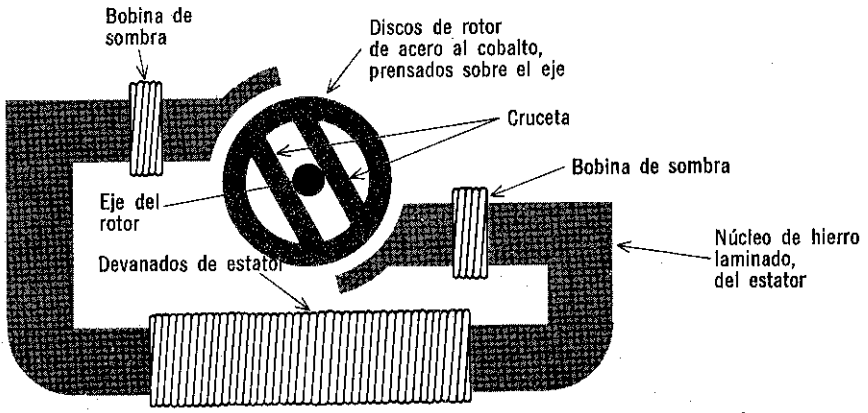
Se dice que este uso de potencia se debe a *efectos de histéresis* y de ahí procede el nombre de motor de histéresis. En el motor de histéresis, la gran cantidad de potencia consumida en el rotor debida a pérdidas de histéresis, proporciona una cantidad considerable de par efectivo para que funcione el motor.



Estas pérdidas se consumen como potencia por el rotor para suministrar par

Las pérdidas por histéresis ocurren cuando las moléculas de una barra de hierro permanecen alineadas en un campo magnético externo después de que se ha cambiado la posición de la barra en el campo





Las pérdidas por histéresis representan consumo de potencia. En el motor de histéresis, se aprovecha este principio. Las pérdidas por histéresis en el rotor de un motor de histéresis hacen que se produzca un par muy elevado

El motor de histéresis arranca como motor de inducción de polo de sombra y funciona como motor síncrono

motor de histéresis (cont.)

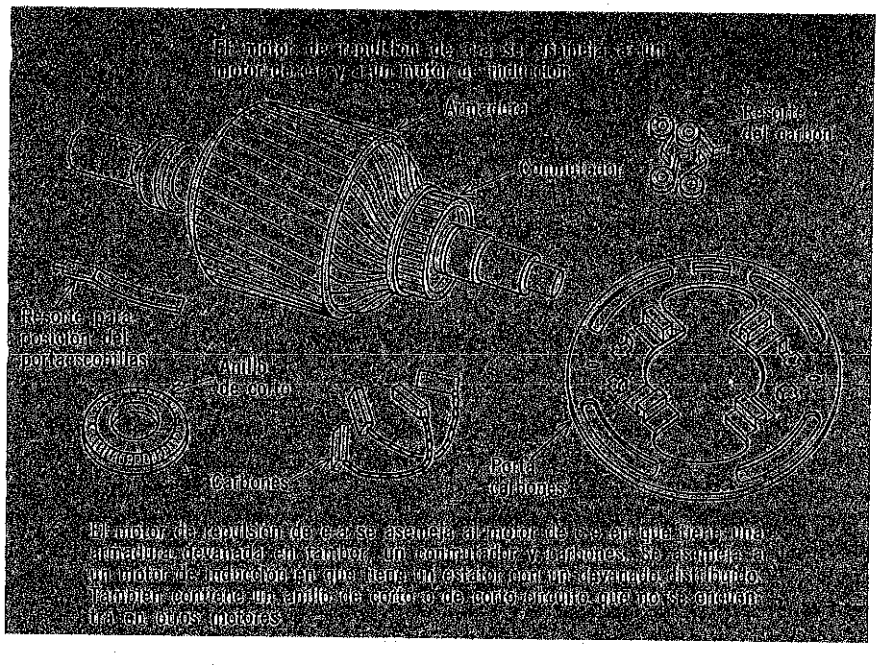
Un motor de histéresis típico tiene un rotor de acero al cobalto. Este material tiene una buena retentividad magnética y es muy permeable a un campo magnético. El rotor se compone de varios discos planos de acero al cobalto montados en un eje. El conjunto del rotor está montado entre dos polos de sombra del estator, hechos de hierro laminado. El efecto del campo magnético producido por los polos de sombra induce una corriente en el circuito del rotor que pone en marcha al motor como motor de inducción. Sin embargo, cuando el motor gana velocidad, ocurren pérdidas por histéresis relativamente elevadas en el rotor del disco, dando origen a un par mayor que el que puede obtenerse en un motor común. Existe una trayectoria de mínima reluctancia a lo largo del eje de las dos crucetas del rotor.

El flujo de corriente inducida en el rotor hace así que se produzcan polos magnéticos permanentes a lo largo del eje de la cruceta. Debido a que el acero al cobalto es retentivo, los polos se mantienen por medio de los efectos del magnetismo residual. Los polos formados de esta manera, se fijan entonces en sincronismo con el campo rotatorio y el motor funciona como si fuera síncrono. El sistema del rotor continúa consumiendo potencia en la forma de pérdidas por histéresis y prevalece el elevado par producido. Este tipo de motor puede mantener velocidad constante muy efectivamente, aun con cambios irregulares en la carga.

Los motores de histéresis son muy conocidos por su aplicación en fonógrafos de alta fidelidad y mecanismos de cintas grabadoras donde es importante una velocidad constante. También se usan en motores de relojes y en otros aparatos de tiempo.

motor de c-a con conmutador

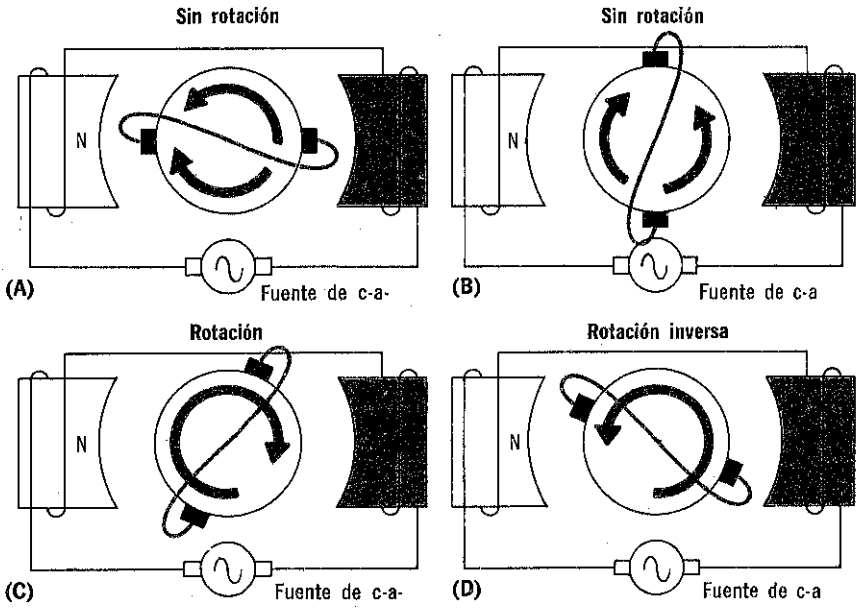
En el estudio de los motores de c-a, hasta ahora se han tratado motores de inducción y motores síncronos. Existe una tercera clase de motores de c-a, conocida como *motores de c-a con conmutador.* Este tipo de motores está construido en forma muy similar al de c-c, ya que tiene escobillas y conmutador. Entre los motores de conmutador de c-a figuran los *motores de repulsión* y los *motores de serie de c-a.*



Entre los clasificados como *motores de repulsión* figura el *motor de repulsión ordinario,* que se pone en marcha y funciona por la llamada repulsión magnética; el *motor de inducción que se pone en marcha por repulsión,* arranca por repulsión magnética y convierte luego su operación a motor de inducción monofásica; finalmente, el *motor repulsión-inducción* que se pone en marcha por repulsión magnética y opera como una combinación de repulsión-inducción.

Los motores de repulsión tienen un estator laminado con devanado distribuido, muy similar al de un motor de inducción. Por otra parte, el rotor del motor de repulsión es una armadura devanada en tambor que tiene conmutador y escobillas muy similares a las que se encuentran en el motor de c-c. Sin embargo, en el motor de repulsión las escobillas están conectadas en corto. El motor común de repulsión funciona a partir de potencia monofásica de c-a y tiene una característica especial que no se encuentra en otros motores, la cual se estudiará más adelante, además de un mecanismo de conexión en corto y de desconexión de escobillas.

manejo de un motor de repulsión



Aunque parecido a los motores tanto de inducción como de c-c, el motor de repulsión funciona en forma *sui generis*, por principio de repulsión magnética. Para simplificar la explicación de este principio, en la figura aparecen polos salientes (que se proyectan hacia afuera). En A, con el eje de escobillas alineado con los polos, el estator induce corrientes iguales y opuestas en las dos mitades de los devanados del rotor. El efecto neto anula el par y el motor no funciona.

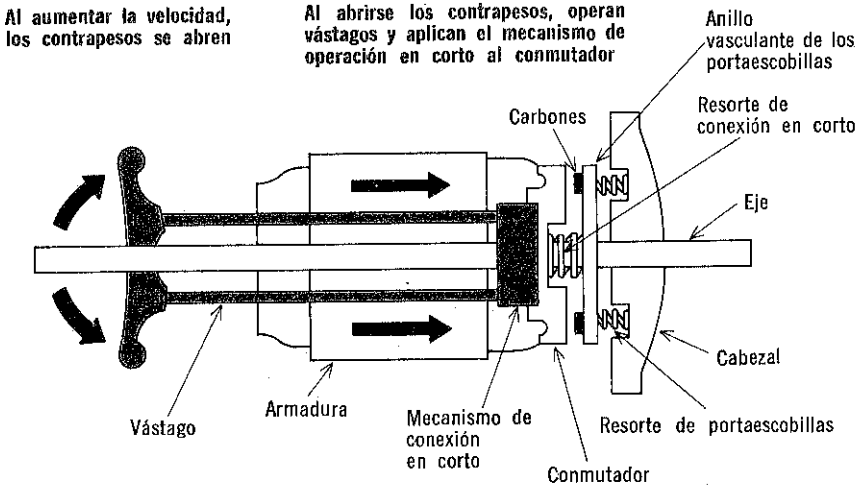
Si el eje de escobillas se coloca perpendicularmente a los polos, como en B, los voltajes inducidos en el rotor se neutralizan, y como no se produce voltaje en las escobillas, no hay corriente de armadura y, en consecuencia, no hay par. Sin embargo, si las escobillas se encuentran en cualquier punto entre la posición de A y B, como en C, existirá un voltaje resultante y habrá corriente en la armadura, originando un campo que produce polos similares entre el rotor y el estator. Esto produce una fuerza de repulsión magnética (par) que hace girar al rotor en dirección del desplazamiento de las escobillas.

Las características de funcionamiento del motor de repulsión son muy parecidos a las de un motor de serie de c-c. Tiene un alto par de arranque y puede funcionar a velocidades relativamente altas bajo cargas ligeras. Para producir la inversión, se desplaza la posición de las escobillas al lado opuesto del plano neutro, como en D. El motor de repulsión siempre gira en la misma dirección en que se desplazan las escobillas con respecto al plano neutro.

motor de inducción arrancado por repulsión

El motor de inducción de arranque por repulsión se pone a funcionar igual que un motor de repulsión ordinario, pero cuando se aproxima a la velocidad normal de funcionamiento se convierte y funciona como un motor de inducción monofásico con rotor devanado. La conversión tiene lugar cuando un dispositivo especial que funciona centrífugamente y llamado *conectador en corto*, hace contacto con la carga interna del conmutador. El conectador en corto es un anillo conductor que une los segmentos del conmutador, y así, desvía todo el flujo de corriente de las escobillas. En este punto, se origina un sistema ordinario de campo magnético rotatorio y el rotor gira según esta acción.

Los mecanismos de conexión en corto y de levantamiento de carbones del motor de inducción de arranque por repulsión son operados por fuerza centrífuga



La disposición es similar a la que se usa para operar el interruptor centrífugo del motor de inducción de arranque por capacitor

Existen dos clases de motores de inducción de arranque por repulsión: el tipo de *escobillas conectadas* y *el de escobillas desconectadas*. En el tipo de escobillas conectadas, éstas se mantienen en contacto con el conmutador aun después de que se ha activado el dispositivo de conexión en corto y el motor funciona como si fuera de inducción. En el tipo de escobillas desconectadas, un mecanismo en el motor levanta las escobillas del conmutador cuando se activa la conexión en corto circuito. Esta acción evita que se desgasten las escobillas y el conmutador cuando el motor funciona como motor normal de inducción.

motor de repulsión-inducción

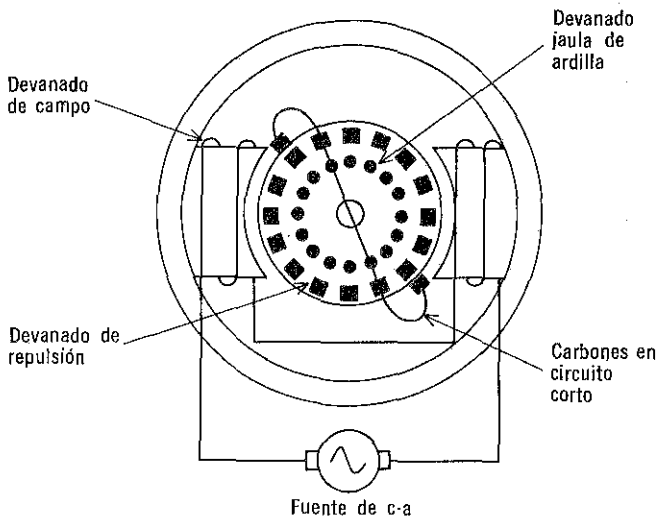
El motor repulsión-inducción es único ya que su rotor combina una disposición de jaula de ardilla y un devanado de tambor con un conmutador y escobillas en corto circuito. Cuando se aplica potencia monofásica de c-a, el devanado de tambor produce el par de arranque por repulsión magnética. Al girar la armadura, también se produce par en el devanado de jaula de ardilla. El par se suma al producido por repulsión.

Como resultado, sin carga, la velocidad a que funciona es ligeramente superior a la velocidad sincrónica, debido al efecto del devanado de repulsión, en tanto que a plena carga, su velocidad es ligeramente inferior a la sincrónica, igual que en el motor de inducción.

Conviene hacer notar que ambos devanados siempre están funcionando cuando gira la armadura. El motor de repulsión-inducción no tiene mecanismos de corto circuito o para desconectar escobillas.

El motor repulsión-inducción puede invertirse cambiando la posición de las escobillas con respecto al plano neutro, como en el caso del motor sencillo de repulsión.

El motor de repulsión-inducción se asemeja al motor de reluctancia

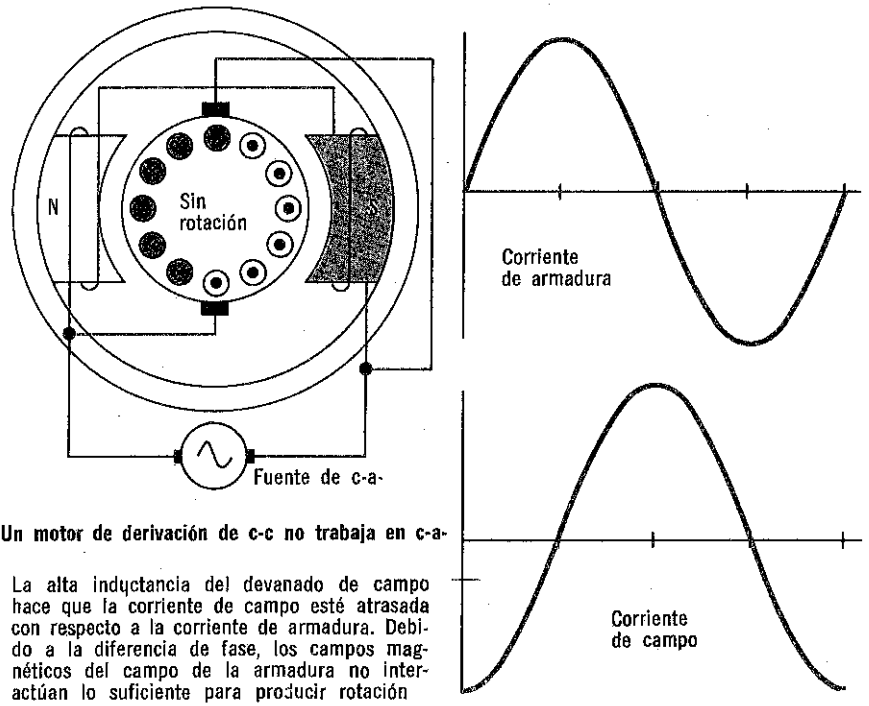


El motor de repulsión-inducción muestra un rotor de jaula de ardilla que actúa como tambor para la armadura devanada. A este respecto, se asemeja al motor de reluctancia. El motor de repulsión-inducción muestra también un conmutador y carbones en corto, que lo hacen diferente del motor de reluctancia

motores de serie de c-a

De acuerdo con lo estudiado sobre los motores de c-c, ¿qué sucedería si se conectara un motor de c-c a una fuente de c-a? Téngase presente que si permanecen constantes las conexiones de armadura y campo, la dirección de rotación de un motor de c-c es fija, independientemente de la polaridad del voltaje aplicado. Si el motor se conecta a c-a, la polaridad cambiaría cada medio ciclo; pero el flujo producido por la armadura y el campo tenderían a producir un par que actuaría en la misma dirección en cada medio ciclo, lo cual significa que cabe esperar que un motor de c-c funcione satisfactoriamente en c-a.

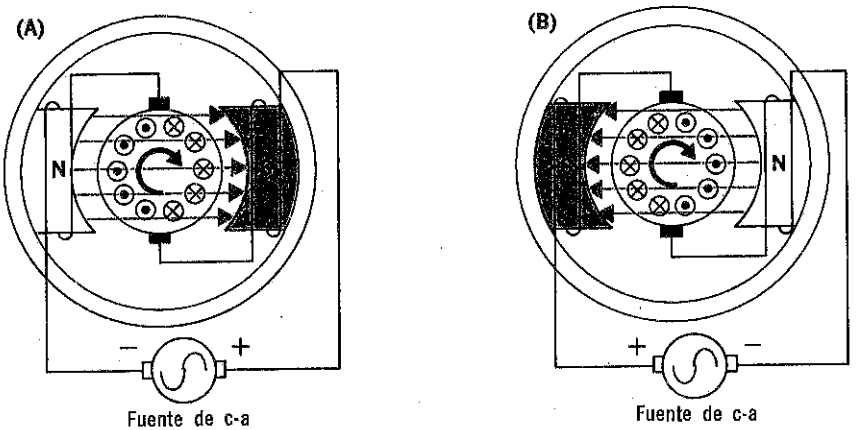
Sin embargo, si se considera un motor de derivación, resulta que la inductancia del devanado de campo, relativamente elevada, hace que la corriente de campo se atrase en un ángulo de fase elevado con respecto a la corriente de armadura. En consecuencia, el motor derivado casi no produce par. En algunos casos, la cantidad de par producido tal vez no sea aún suficiente para vencer la inercia de las fuerzas de fricción y el motor ni siquiera se ponga en marcha. Sin embargo, en el caso de un motor de serie la corriente en el campo y en la armadura son iguales y teóricamente puede producirse un par adecuado y, de hecho, el motor de c-c en serie puede funcionar con c-a.



Un motor de derivación de c-c no trabaja en c-a

La alta inductancia del devanado de campo hace que la corriente de campo esté atrasada con respecto a la corriente de armadura. Debido a la diferencia de fase, los campos magnéticos del campo de la armadura no interactúan lo suficiente para producir rotación

Cuando se aplica una corriente alterna a las terminales de entrada de un motor serie de c-a, debido a la disposición del devanado en serie, tanto el flujo de campo como la corriente de armadura se invierten simultáneamente en cada medio ciclo. Debido a que ambos cambian al mismo tiempo, la dirección de la rotación permanece igual para cada ciclo



Aunque el diagrama básico se asemeja al motor de serie c-c, los motores prácticos de serie de c-a tienen características especiales de diseño que facilitan su empleo en potencia c-a

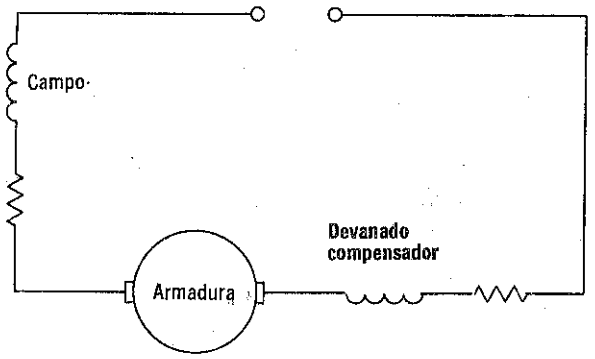
motores de serie de c-a (cont.)

En el motor de serie práctico de c-a, la armadura y el campo están devanados y conectados en la misma forma que un motor de serie de c-c. Cuando se aplica c-a a las terminales, el flujo de campo y cada medio ciclo, la corriente de armadura invierten simultáneamente su sentido. Como los devanados de campo y de armadura están conectados en serie, la dirección de rotación permanece igual para cada medio ciclo de c-a.

Existen ciertas limitaciones en el funcionamiento de motores de serie de c-c cuando se conectan en c-a. La más notable es que el flujo alterno del campo ocasiona grandes pérdidas por corrientes parásitas e histéresis; la autoinducción de los devanados de campo y de armadura produce un bajo factor de potencia y, por lo tanto, es ineficiente; y la reacción de armadura produce chisporroteo excesivo en el conmutador. Si se puede encontrar alguna manera de vencer estas limitaciones, puede construirse un motor de c-c que funcione satisfactoriamente en c-a.

En el motor en serie de c-a, las limitaciones se superan ajustando el diseño de un motor de c-c, de modo que figuren los siguientes elementos:

1. Los polos de campo y el núcleo se laminan para reducir al mínimo las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis.
2. El factor de potencia mejora reduciendo la reactancia del devanado de campo por el uso del menor número posible de espiras en el campo. Así se obtiene un alto flujo en el campo mediante un circuito magnético de baja reluctancia.
3. La reactancia de armadura se reduce mediante un devanado compensador en las caras polares.

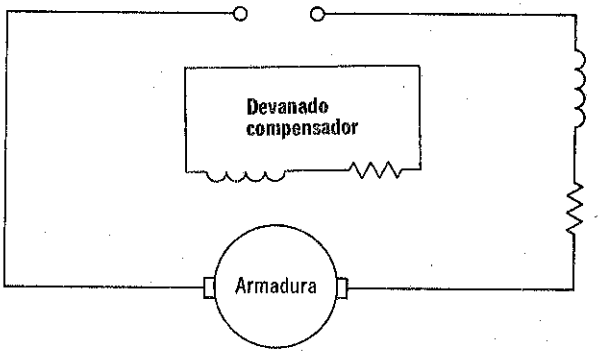


COMPENSACION CONDUCTIVA

Los devanados compensadores deben conectarse en serie con los devanados de campo y armadura para operación ca-cc

motor de serie de c-a con devanado compensador

Una característica importante de los motores serie de c-a es el uso de motores compensadores para reducir la reacción de armadura. El medio más común para esta compensación implica incrustar devanados compensadores distribuidos en las caras laminadas de los polos del motor. Si el motor de serie de c-a tendrá aplicaciones tanto con c-a como con c-c, el devanado compensador se conecta siempre en serie con la armadura y se dice que el motor está compensado *conductivamente*. Si el devanado compensador está conectado en corto circuito sobre sí mismo, se dice que el motor está compensado *inductivamente*.

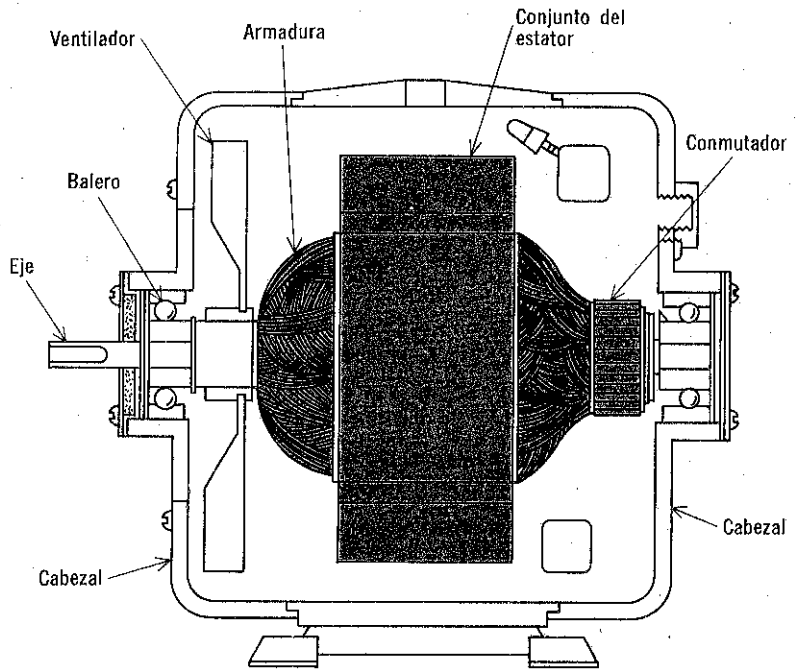


COMPENSACION INDUCTIVA

motores universales

Los motores universales son motores en serie de potencia fraccional, de c-a, diseñados especialmente para usarse en potencia ya sea de c-c o de c-a. Estos motores tienen la misma característica de velocidad y par cuando funcionan en c-a o en c-c. En general, los motores universales pequeños no requieren devanados compensadores debido a que el número de espiras de su armadura es reducido y por lo tanto, también lo será su reactancia de armadura. Como resultado, los motores inferiores a $\frac{3}{8}$ de caballo generalmente se construyen sin compensación. El costo de los motores universales no compensados es relativamente bajo por lo que su aplicación es muy común en aparatos domésticos ligeros, por ejemplo aspiradoras, taladros de mano, licuadoras, etc.

Los motores universales grandes tienen algún tipo de compensación. Normalmente se trata del devanado compensador del motor de serie o un devanado de campo distribuido especialmente para contrarrestar los problemas de la reacción de armadura.



El motor universal opera igualmente bien en c-a y en c-c. Los motores universales fraccionales operan bien en c-a sin la necesidad de compensación debido a que la resistencia de su armadura es baja

resumen

☐ Los motores de polos consecuentes pueden funcionar a múltiples velocidades haciendo posible una redisposición del devanado a los polos individuales de cada juego de polos, de manera que actúen como monopolos. ☐ Consecuentemente, se crean polos virtuales opuestos entre cualesquiera polos adyacentes iguales. ☐ Esto tiene el efecto de duplicar el número de polos para reducir a la mitad la velocidad síncrona.
☐ El rotor del motor de reluctancia tiene espiras de jaula de ardilla en corto de manera que puede ponerse en marcha como motor de inducción y polos salientes de hierro dulce; así que funciona como motor síncrono después de haber cobrado velocidad.
☐ El motor de histéresis es un motor síncrono con rotor de acero al cobalto que, debido a pérdidas de histéresis, produce un par mayor que el motor síncrono ordinario.

☐ El motor de conmutador de c-a está construido en forma muy similar al motor de conmutador de c-c. ☐ El rotor del motor de repulsión de c-a tiene un conmutador y escobillas en corto para seleccionar espiras en corto que, por inducción electromagnética, producen polaridades magnéticas que son repelidas por el campo rotatorio. El motor de inducción de marcha por repulsión comienza funcionando como motor de repulsión pero luego funciona como un motor de inducción de rotor devanado. ☐ El motor repulsión-inducción se pone en marcha por repulsión magnética y funciona según ambos principios. ☐ Los motores de serie de c-a funcionan en forma similar a los motores de serie de c-c, pero deben diseñarse para reducir al mínimo las pérdidas por corrientes parásitas, y por histéresis, reactancia del devanado de campo y reacción de armadura.

preguntas de repaso

1. ¿Cómo se haría el alambrado de los polos de un motor de cuatro para producir cuatro polos consecuentes?
2. ¿A qué velocidad funcionaría el motor de la pregunta 1 en 60 cps si fuese síncrono?
3. ¿Qué se añadiría a un motor de inducción de jaula de ardilla para hacerlo de reluctancia? ¿Qué material se usaría?
4. ¿De qué manera difiere el material de la pregunta 3, en propiedades magnéticas, del que se usa en el motor de histéresis?
5. ¿Cuál es la diferencia básica en operación entre el motor de inducción de rotor devanado y el motor de repulsión de c-a?
6. ¿Qué se hace al motor de marcha por repulsión para que funcione como motor de inducción?
7. Describa la estructura del rotor del motor de repulsión-inducción.
8. ¿Por qué algunos motores de serie de c-c pueden funcionar en c-a?
9. ¿Qué consideraciones de diseño deben tomarse respecto a un motor de serie si va a usarse en c-a?
10. ¿Necesitan compensación los motores de serie de potencia fraccional usados generalmente en aparatos domésticos? ¿Por qué?

Armadura, corriente de, 7-6
Armadura, dúplex, 7-14
Armadura, núcleo de, 6-76, 6-99, 7-25
Armadura, reacción de 6-79, 6-81, 691, 692, 7-20, 7-21
generadores, 7-41
motores, 7-41
Armaduras, 3-9, 6-71, 6-99, 6-100, 7-6
cuádruple, 7-16
devanado de tambor, 7-27
dúplex, 7-14
estacionarias, 6-132
múltiple, 7-14
simple, 7-8
Armaduras cuádruples, 7-16
conmutación, 7-19
Armadura, segmentos de, 6-101
Armadura simplex, 7-8
Arqueado, 7-18
Arqueado o arqueo, 3-115
Arrancador de contacto doble para motores de serie, 7-75
protección sin carga, 7-75
Arrancadores, 7-70
clasificación, 7-71
Arrancadores de contacto cuádruple,
para motores compound, 7-76
para motores de derivación, 7-76
Arrancadores de contacto triple
motores compound, 7-72, 7-73
motores de derivación, 7-72, 7-73
motores de serie, 7-74
Atómicas, cargas, 1-15
Atómicas, trayectorias, 1-25
Atómico, blindaje, 1-25
Atomos, 1-8, 1-9
Atracción, 1-20, 1-21
Atracción, fuerza de, 1-18
Autoinducción, 3-47, 3-51, 6-91
efecto de la forma del conductor, 3-52
Automáticos, controles, 7-87
Autotransformadores, 3-88, 3-89
Auxiliar, devanado, 7-96
Auxiliar, dispositivo, falla de, 2-125

B

Banda de resonancia, 4-105, 4-140
Bario, titanato de, 1-40
Barra, imán de, 1-77
Básico, medidor, 5-2
Batería primaria, 6-4
Baterías, 1-39, 1-52, 2-5, 2-122, 3-115, 5-93, 6-4, 6-23, 655, 6-111
Ver también: Celdas
alcalinas, 6-20, 6-44
cargas, *ver,* cargadores
clasificación de corriente, 6-55, 6-56
clasificación de corriente constante, 6-20
construcción, 6-41
corriente de alimentación, 6-8
de celdas múltiples, 6-51
de mercurio, 6-20
de plomo-ácido, *ver* celdas plomo-ácido
desarrollo de voltaje, 6-7
descargadas, 6-39
historia de las primeras, 6-5
lista de clasificación de voltajes, 6-53
orificios de ventilación, 6-31
primarias, 6-4
químicas, 7-2
resistencia interna, 6-54
secas, 6-4
tipos, 6-4, 6-52
totalmente cargadas, 6-29, 6-39
Baterías alcalinas, 6-20
Baterías secundarias, *ver* acumuladores
Blindaje magnético de transformador con núcleo de aire, 1-79, 3-87
Bobina de sombra, 7-99
Bobina móvil, medidores, 5-7, 5-9, 5-10, 5-17, 5-18, 5-24, 5-40, 5-44
amortiguamiento, 5-32
escalas, 5-29
Bobinas, 1-86, 1-88, 1-98, 3-55, 3-71, 5-23
armadura, 6-86, 6-102
calidad (Q), de, 4-36
campo, 6-104
Brújula magnética, 1-74

C

Caballaje, 2-54
Cabezales, 6-105, 7-36
c-a, generadores, de, 6-105
alternador de automóvil, 6-134
armadura estacionaria, 6-121, 6-122
bifásicos, 6-124
campo magnético, 6-120
clasificación, 6-131
comparación con generadores de c-c, 6-133
corazas, 6-32
estructura, 6-132
excitación separada, 6-120
monofásicos, 6-123
regulación, 6-130
salida de onda, sinusoidal, 6-118
trifásicos, 6-125
c-a, capacitores electrolíticos de, 3-138
c-a, circuitos de, 3-1, 3-62, 3-117
inductivos, 3-62
c-a, circuitos resistivos de, 3-33
fase, 3-35
c-a, fuentes de potencia en, 3-1, 3-8, 3-9
alternadoras, 3-8, 3-9
generadores, 3-8, 3-9
símbolo, 3-8
c-a medidores de, 5-40
aplicaciones, 5-40
calibración, 5-47
precisión, 5-48

Indice

A

Abrazadora, amperímetro de, 5-75
Acido sulfúrico, 6-7, 6-29, 6-39
Acoplamiento, 3-73
  coeficientes de, 3-73
  crítico, 3-72
  estrecho, 3-72
  débil, 3-72
Acoplamiento estrecho, 3-72
Actividad interna, 6-9
  en celdas secas, 6-17
Acumulativa, motores de composición, 7-65, 7-66, 7-69
Agujeros para aceite, 7-36
Aire como dieléctrico, 3-114
Aisladores, 1-31, 1-33, 1-35, 1-91, 2-8
Aislamiento, 2-19
Aislantes, núcleos, 3-45, 3-55
Ajuste en cero, 5-26
Ajuste grueso, 3-81
Alambres abiertos, 2-122
Alambres en filástica, 3-38
Alcalinas, baterías, 6-20
Alcalinas, celdas
  carga, 6-45
  celda de Edison, 6-49
  celda de níquel-cadmio, 6-44, 6-49
  celda de níquel-hierro, 6-49
  celda de plata-cinc, 6-44, 6-49
  ciclo de descarga, 6-48
  desarrollo de una fem, 6-48
Alcalina, celda secundaria, 6-44
Alcance múltiple, derivaciones de medidores, 5-61
Alcance múltiple, medidores de corriente de rango múltiple, 5-60, 5-63
Alcance múltiple ohmímetros en serie, 5-98, 5-99, 5-100
Alcance múltiple, resistencias multiplicadoras de medidores, 5-83
Alcance múltiple, voltímetros, 5-82
Alta resistencia, circuitos medición de, 5 112
Alternaciones, 3-27, 5-41
Amalgama, 6-9
Ambar, 1-2
Amortiguamiento, 5-31
  de un medidor de bobina móvil, 5-32
  de un medidor de hierro móvil, 5-34
Amortiguamiento, cámara de, 5-34
Amortiguamiento, claro de, 5-34
Amortiguamiento de aire, 5-34
Amortiguamiento, paleta de, 5-34
Amper, 1-57
Ampere, 2-12, 2-16, 2-54
Ampere-horas, 6-55, 6-56
Amperímetro técnico, 5-14, 5-15
Amper-vueltas, 1-88
Amplitud, 3-27, 3-28
Ancas de rana, embobinadas, 6-86
Ancho de banda, 4-105
Angular, movimiento, 3-11
Angulos de fase de onda sinusoidal, 4-18
Anillos rozantes, generadores de, 6-117
Aparato telegráfico, 1-95
Aparente, potencia, 3-134, 4-49, 5-107, 6-131
  circuitos en serie RL, 4-35
Argón, 1-63
Armadura, 1-93, 1-96
Armadura, bobinas de, 6-72, 6-86, 6-102
  autoinducción, 6-93
Armadura, cojinetes de, 6-106

Cargadores, 6-21
corriente constante, 6-40
voltaje constante, 6-40
Cargadores de corriente constante, 6-40
Carga en rotación, 1-67
Carga, falla por, 1-24
Carga gradual, 6-40
Carga lenta, 6-40
Carga, métodos de, 6-40
Carga pico del capacitor, 3-131
Carga, resistencia de, 2-21
Cargas, 2-2, 2-4, 3-73, 3-76, 7-47
paralelo, 2-76
Cargas eléctricas, 1-14
atómica, 1-15
electrostática, 1-14
fotoeléctrica, 1-42
negativa, 1-12, 1-14, 1-15
neutralizadora, 1-19
piezoeléctrica, 1-61
positiva, 1-11, 1-14, 1-15
termoeléctrica, 1-41, 6-57
Cargas en paralelo, 2-76, 2-77, 2-78
caída de tensión de, 2-77
efecto en la corriente, 2-78
Cargas negativas, 1-12, 1-14, 1-15
Cargas positivas, 1-11, 1-14, 1-15
en circuitos capacitivos, 3-118, 3-119, 3-120
en circuitos inductivos, 3-63, 3-64
medición, 5-114
promedio, valores, 3-34
raíz cuadrática media, (RMC) valores, 3-30
valores de conversión, 3-31
valores efectivos, 3-34
valores instantáneos, 3-34
valores pico, 3-34
valores pico a pico, 3-28, 3-31
Carga velocidad, característica, 7-48
Carga, voltaje de, 6-53
Contactor magnético, 7-87
c-c, controles de motores, 7-70
c-c, circuitos, 2-6, 3-115
capacitancia, 3-115
fluctuantes, 3-131
inductancia, 3-58, 3-61
c-c, corriente, 2-6, 3-1, 3-3, 3-115
efecto sobre una resistencia, 3-2
fluctuantes, 3-20, 3-21, 6-68
c-c, excitatriz, 6-132
c-c fallas de circuitos, 2-121
c-c, formas de onda, 3-13
c-c, fuente, 2-6
c-c, generadores, 2-112, 6-62, 6-63
alternador de automóvil, 6-134
combinación (compound), 6-82, 6-83
combinado compensado, 6-83
comparación con generadores de c-a, 6-133
coraza, 6-75, 6-103
corriente, regulación de, 6-110
cuatro polos, 6-101, 6-104
derivado, 6-80, 6-81
devanados, *ver* devanados
dos polos, 6-101, 6-104
montaje, 6-105
polos, 6-76
regulación combinada, 6-113
regulación de voltaje, 6-108, 6-109
c-c, medidores, 5-40
aplicaciones, 5-40
calibración, 5-47
precisión, 5-48
c-c, motores
clasificación, 7-51
comparación, 7-68
construcción, 7-24
elementales, 7-10
operación, 7-17
c-c, nivel de referencia, 3-21; 3-131
salida de onda sinusoidal, 6-66
serie, 6-78, 6-79
eje o flecha, 6-100
en serie con derivación
estructura, 6-98, 6-106
excitado separadamente, 6-77
c-c, tensión, 2-6
c-c, tensión de trabajo, 3-136
Celda húmeda primaria, 6-6
limitaciones, 6-13
Celdas, 1-39
ver también baterías
clasificación de voltaje, tabla de, 6-53
de cinc-cobre, 6-8
de níquel-cadmio, 6-44, 6-49
de níquel-hierro, 6-49
de plata-cinc, 6-44, 6-49
de plomo-ácido, *ver* celda plomo-ácido
secas, 6-4
secas de cinc-carbón, 6-16
solares, 6-59
termoeléctricas, 6-57, 6-58
voltaicas, 6-6, 6-57
Celdas húmedas, 6-4
primarias, 6-6, 6-13
Celda seca primaria, 6-15
Celda seca rejuvenecedora, 6-21
Celdas secas, 5-54
Celdas secas a prueba de fuga, 6-19
Celdas solares, 6-59
Celdas termoeléctricas, 6-57, 6-58
Celdas voltaicas, 6-6
tipos, 6-57
Centrífugo, interruptor, 3-135
Cerámica, capacitores de, 3-135
Cero ohms, control de ajuste en, 5-94
Cesio, 1-42
Chisporroteo, 7-18
Chokes, (reactores) *ver* inductores
Ciclo, 3-23
Cinc, 1-41
Cinc-carbón, celdas secas de, 6-16

c-a, monofásica, 7-96
c-a, motores, 7-89
ver también tipos específicos de motor
c-a, motores de serie, 7-132, 7-136, 7-137
compensación, 7-138
Cadmio, 1-42
Caídas de tensión, 2-62, 2-64, 2-66
cálculos, 2-63
en cargas en paralelo, 2-77
Cálculos de circuitos en paralelo producto/suma, 2-84, 2-85, 2-95, 2-108, 4-52
Calentador eléctrico, 1-92
Calibrador de alambre Brown and Sharpe, 2-17
Calibre de alambre estándar americano (American Standard Wire Gauge), 2-17
Calibres de alambre, 2-17, 2-18
Calidad de resonancia en serie (Q), 4-108
Calidad (Q) de una bobina, 4-36
C. A., circuitos de Ley de Ohm, 4-33
Calor, 1-41, 1-61, 1-71
Campo alterno, 7-91
Campo, bobinas de, 7-35
Campo, bobinas de, 6-75, 6-104
Campo electromagnético, 1-67, 1-84
Campo magnético primario, 3-76
Campo magnético rotatorio, 7-93, 7-94, 7-95
Campo rotatorio bifásico, 7-100
Campo rotatorio de fase dividida, 7-96
inversión de dirección, 7-96
Campo rotatorio del estator, 7-92
Campo rotatorio de polo de sombra, 7-99
Campo rotatorio trifásico, 7-101
Campos eléctricos, 3-100
Campos magnéticos, 1-43, 1-76, 1-81, 1-83, 185, 3-43, 3-46, 4-34, 5-3, 5-8
de la Tierra, 1-72
generadores de c-a, 6-120
generadores c-c, 6-63, 6-73
intensidad de campo, 1-83
interacción, 1-78, 5-7
Campos rotatorios, 6-212, 6-132
Cantidades escalares, 4-3
Capacidad de cubierta o blindaje, 1-26
Capacitancia, 3-42, 4-1
efecto de la dieléctrica, 3-113
efecto de la separación de placas, 3-111, 3-112
efecto sobre la corriente del capacitor, 3-123
en circuitos de c-c, 3-115
unidades, 3-105
valores, 3-109, 3-136
Capacitiva, constante, de tiempo, 3-106, 3-107
Capacitiva, corriente, 4-60
vs. capacitancia, 3-124
vs. frecuencia, 3-124
Capacitivos, circuitos, 4-2
fluctuantes de c-c, 3-131
vectores, 4-18, 421
Capacitor, campo rotatorio de arranque por, 7-97
Capacitor, claves de color, 3-139
banda de coeficiente de temperatura, 3-140
banda de tolerancia, 3-140
Capacitor, corriente de, efecto de la capacitancia, 3-123
efecto de la frecuencia, 3-131, 3-122
Capacitores, 3-21, 3-98, 5-103
área de placas, 3-110
carga de, 3-99
carga de un circuito c-c, 3-101, 3-102
cerámica, 3-135
contra tensión, 3-135
de papel, 3-135
descarga, 3-103
descarga en un circuito c-c, 3-104
electrolíticos, 3-137, 3-138
en paralelo, 3-128
fijos, 3-135
polarizados, 3-137
serie, 3-127
símbolo, 3-127
tensión, 3-118, 3-119
tipos, 3-135
variables, 3-135
Capacitores de papel, 3-135
Capacitores electrolíticos del tipo de celda húmeda, 3-138
Capacitores en paralelo, 3-128
Capacitores fijos, 3-135
construcción, 3-135
símbolos, 3-135
Capacitor, motores de, 7-97
inversión de dirección, 7-97
Capacitor, motores de arranque por, operación de inducción, 7-115
Capacitores polarizados, 3-137
Capacitores serie, 3-127
Capacitores variables, 3-135
construcción, 3-136
símbolo, 3-136
Capas o bandas electrónicas, 1-25
Capas o bandas orbitales, 1-23
Carbón, regulador de pila, 6-96
Carbones, 7-9
Carbones, conjunto de, 7-33
Carbones, eje, 7-20
Carbones, sujetadores, 6-103
Carga
celdas alcalinas, 6-45, 6-46
celdas de plomo-ácido, 6-25
descendentes, 6-40
flotación, 6-40
lenta, 6-40
por contacto, 1-17
por inducción, 1-18
rápida, 6-40
Carga, corriente de, 3-102, 6-27, 6-28, 6-31
Cargada, batería, 6-39

Cinc-cobre, 6-8
Circuito completo (cerrado), 2-2
Circuito completo (cerrado), 1-51, 1-55
Circuito, continuidad de, 5-101
Circuito de medidores de puente, 5-113
Circuito eléctrico, 2-1, 2-2
Circuito, fallas de c-c, 2-121
Circuitos
  abiertos, 2-2
  cerrados, 2-2
Circuitos abiertos, 1-52, 2-2, 2-67, 2-91, 3-104
Circuitos c-a, no resistivos, 3-42
Circuitos capacitivos, c-a, 3-117
Circuitos c-c, fluctuantes capacitivos, 3-131
Circuitos cerrados, 2-2
Circuitos en paralelo, 2-75, 2-76, 2-97, 2-106, 2-107
Circuitos en paralelo RL, 4-41, 4-34, 4-44, 4-46, 4-46
  ángulo de fase, 4-53
  comparación con circuitos en serie RL
  corriente, 4-53
  corriente de rama, 4-44
  efecto de la frecuencia, 4-53
  formas de onda de corriente, 4-47
  impedancia, 4-48, 4-53
  potencia, 4-49, 4-53
  referencia de cero grados, 4-43
  tensión, 4-43, 4-53
Circuitos en serie, 2-55, 2-70, 2-97, 2-106, 2-107, 2-108
Circuitos en serie-paralelo, 2-99, 2-100, 2-101, 2-102, 2-103, 2-104, 2-105, 2-106, 2-107, 2-108
Circuitos en serie y paralelo, 4-145
Circuitos en serie RC, 4-56
  ángulo de fase, 4-75
  comparación con circuitos en paralelo RC, 4-75
  corriente, 4-60, 4-75
  efecto de la frecuencia, 4-61, 4-75
  formas de onda de tensión, 4-58
  impedancia, 4-59, 4-75
  potencia, 4-75
  tensión, 4-57, 4-75
Circuitos, impedancia, 4-64
Circuitos filtro (o de filtraje), 4-148
  tipos básicos, 4-149
Circuitos LC en serie, 4-78
  corriente, 4-83
  efecto de la frecuencia, 4-84
  forma de onda de tensión, 4-81
  impedancia, 4-82
  potencia, 4-83
  tensión, 4-79, 4-80
Circuitos
  LC, 4-77
  LCR, 4-77
  LC en paralelo, 4-123
  LCR en paralelo, 4-123
  LC en serie, 4-78
  LCR en serie, 4-89
  RC, 4-55
  RL, 4-24
  RC en paralelo, 4-66
  RL en paralelo, 4-41
  RL en paralelo, 4-41, 4-43, 4-44, 4-45, 4-46
  RL en serie, 4-27, 4-28
Circuitos LC, 4-77
  en paralelo, 4-42, 4-115, 4-132
  en serie, 4-78
Circuitos LC en paralelo, 4-42, 4-115, 4-132
  corriente, 4-116
  corriente en resonancia, 4-134
  corriente fuera de resonancia, 4-135, 4-136
  efecto de la frecuencia, 4-120
  formas de onda de corriente, 4-118
  impedancia, 4-119
  impedancia en resonancia, 4-134
  impedancia fuera de resonancia, 4-135, 4-136
  tensión, 4-115
Circuitos LCR en paralelo, 4-123
  corriente, 4-125, 4-126
  efecto de la frecuencia, 4-129
  formas de onda de corriente, 4-127
  impedancia, 4-128
  tensión, 4-124
Circuitos RC en paralelo, 4-66
  ángulo de fase, 4-75
  comparación con circuitos en serie, RC, 4-75
  corriente, 4-75
  corriente de línea, 4-69, 4-70
  corriente en una rama, 4-68
  efecto de la frecuencia, 4-73, 4-75
Circuitos resonantes en serie
  ancho de banda, 4-144
  calidad (Q), 4-144
  corriente, 4-144
  frecuencia de resonancia, 4-144
  impedancia, 4-144
  propiedades en resonancia, 4-144
  propiedades fuera de resonancia, 4-144
  reactancia, 4-144
  usos prácticos, 4-109
Circuitos RL en serie, 4-27, 4-28
  ángulo de fase, 4-53
  comparación con circuitos en RL paralelo, 4-53
  corriente, 4-53
  efecto de la frecuencia, 4-37, 3-53
  formas de onda de tensión, 4-31
  impedancia, 4-53
  potencia, 4-35, 4-53
  potencia, 4-35, 4-53
  potencia aparente, 4-35
  potencia real, 4-35

referencia de grado cero, 4-30, 4-34
tensión, 4-29, 4-30, 3-53
Circuitos sintonizados, *ver* Circuitos LC
Circulantes, corrientes, 6-99
Circulantes, corrientes, 3-37, 3-38, 3-92
efecto de la frecuencia, 3-38
Circulantes, corrientes, 5-32
Circulantes, pérdidas por corrientes, 7-25
Clasificación de corriente constantes de las baterías, 6-20
Clasificación de potencia, 2-50, 2-51, 4-64
de lámparas incandescentes, 2-50
de resistencias, 2-26, 2-49
Cobre, 1-34, 1-41
deposición (depósito), 1-60
Coeficiente de acoplamiento, 3-72, 3-86, 3-90
Coeficiente de temperatura, 2-15
negativa, 2-15
positiva, 2-15
Coeficiente negativo de temperatura, 2-15
Cojines, 6-100
armadura, 6-106
lubricadas permanentemente, 6-106
Cojinete de mango de anillo, 7-37
Cojinetes, 5-28, 7-36, 7-37
de bola, 7-37
de manguillo de anillo, 7-37
Cojinetes de balines, 7-37
Combinación, generadores, 6-82, 6-83
Combinación simple, generador, 6-83
Compensadores, devanados, 5-95, 6-95
Compensados, motores de serie de c-a
conductivamente, 7-138
inductivamente, 7-138
Compensados, 5-109
Complejos, circuitos, 2-114
Componentes de vectores, 4-15
Composición, resistencias, 2-27, 2-28, 2-29
Compound, motores, 7-64, 7-65
arrancador de contacto cuádruple, 7-76
compound acumulativo, 7-65, 7-66
compound acumulativo de derivación corta, 7-65
compound acumulativo de derivación larga, 7-65
compound diferencial, 7-65
Compuertas (compuestas), 1-6, 1-7
como aislantes, 1-32
Compuestos (compound) devanados de armadura, 6-133
Comunicaciones, 3-7
Conductancia, 2-8, 2-10, 2-111
Conductivamente compensados, motores serie de c-a, 7-138
Conductores, 1-30, 1-34, 1-35, 1-42, 1-62, 1-91
Conductor, anillo, 7-111
Conductores, 2-8, 2-11, 2-13, 2-14, 3-43
en especial, 3-52
Conductores embobinados, 3-52
Conexión y, 6-126
características eléctricas, 6-127, 6-128
Conmutación, 7-18
armadura cuádruple, 7-19
Conmutación, plano de, 6-93
Conmutada, bobina, 6-91
Conmutador de anillo partido, 7-8
Conmutador, segmentos de, 6-69, 6-71, 6-102, 7-32
Conmutadores, 1-96
Conmutadores, 6-63, 6-67, 6-68, 6-99, 6-102, 6-132
rectificadores, 6-135
Conmutadores, 7-7, 7-8, 7-9, 7-32
anillo abierto, 7-8
Consecuentes, motores de polos, 7-125, 7-127, 7-128
monofásicos, 7-128
Constantano, 2-24
Constantes de tiempo, capacitivas, 3-106, 3-107 inductivas, 3-61
Construcción del paralelogramo de vectores, 4-8, 4-21
Consumo de potencia, 2-61, 2-90
Contactor magnético, 7-87
Contrapar, 7-49
Contrapesos, 5-24
Control de velocidad, subida y bajada, 7-78, 7-81, 7-82
Controles, 7-70, 7-78
automáticos, 7-89
clasificación, 7-71
de tambor, 7-83
para velocidad superior a la normal, 7-78
para velocidades superior e inferior a la normal, 7-78, 7-81, 7-82
Convertidor, 6-135
Copa de aceite, 6-106, 7-37
arrancador de contacto triple, 7-72, 7-73
Corazas:
motor, 7-30
Corazas,
generadores de c-a, 6-132
generadores de c-c, 6-105
Corazas, motor y generador, 7-25
cabezales, 6-105, 7-36
campo, 7-36
Corriente
capacitiva, 4-60
de fuga, 4-56
derivación, 4-45, 4-48
en circuitos LC en paralelo, 4-116
en circuitos LCR en paralelo, 4-125, 4-126, 4-127
en circuitos LC en serie, 4-83
en circuitos LCR en serie, 4-95
en circuitos RL en paralelo, 4-53
en circuitos RC en serie, 4-60, 4-75
en circuitos RL en serie, 4-53
en la línea, 4-45, 4-46, 4-48
vs. resonancia, 4-104

Corriente, 1-45, 2-17, 2-54, 2-97, 2-108
alterna, 1-99, 2-6
amperes, 1-57
cálculos, 2-39
capacitor, 3-119, 3-120
carga, 3-102
de fuga, 3-126
derivación, 2-78, 2-79, 2-80
directa (continua c-c), 2-12
directa, (continua c-c), 3-115, 5-72
descarga, 3-103
efecto de cargas paralelas, 2-78
en transformador, 3-75, 3-77
primaria, 3-74, 3-76
secundaria, 3-76
Corriente, c-a, 1-45, 1-47, 2-6, 3-1, 3-2, 3-3, 3-34, 5-41
características, 3-17
efecto sobre la resistencia, 3-2
en circuitos de capacitancia, 3-119, 3-120, 3-122, 3-123
en circuitos inductivos, 3-63, 3-64
valores, 3-28
valores de conversión, 3-31
valores efectivos, 3-34
valores instantáneos, 3-34
valores pico, 3-34
valores promedio, 3-34
Corriente, c-c, 1-99
Corriente, clasificaciones de, 2-26, 6-51
Corriente de excitación, 6-77
Corriente de fuga, 3-126, 4-56
Corriente de regulación de generadores, c-c, 6-110
Corriente e impedancia, 4-32, 4-33, 4-34
Corriente eléctrica, 1-45, 1-47, 2-12
Corriente electromagnética, 5-8, 5-9
Corriente, flujo de, 1-48, 2-7
Corriente, formas de onda de
en circuitos en paralelo LC, 4-118
en circuitos en paralelo LCR, 4-127
en circuitos en paralelo RC, 4-71
en circuitos en paralelo RL, 4-47
Corriente frecuencia, curva de, 4-136
Corriente, medidores de, 5-3
Corriente, portadores de, 1-50
Corriente primaria, 3-71, 3-74, 3-76
Corriente, regulador de, 6-113
Corriente, resistencias limitadoras de, 5-93, 5-98
Corrientes de transformador, 4-150
Corriente secundaria, transformador, 3-71, 3-76
Corriente total, 2-80, 2-93, 2-94, 2-96, 2-111
Corto circuito, 1-54, 1-94, 2-68, 2-69, 2-92
interno, 2-122
Cortos circuitos, 3-42
Coulomb, 1-56, 1-57, 2-45, 3-105
Coulomb, Ley de, 1-21, 3-111
Covalente, unión, 1-32
Cristal, rectificadores de, 5-114
Crítico, acoplamiento, 3-72
Cuatro polos, estator, 7-105
Cuatro polos, generadores de, 6-101, 6-104
Curva de resonancia, 4-104

D

D'Arsonval, 5-10
d'Arsonval, mecanismo de medidores, 5-10
d'Arsonval, medidores, 5-18
Delta, conexión, 6-126
características eléctricas, 6-127, 6-128
Densidad, 6-39
Densidad de flujo, 3-94
Deposición (depósito), 1-60
cobre, 1-60
oro, 1-60
plata, 1-60
Deriva electrónica, 1-47
Devanado secundario, transformador, 3-71, 3-73, 3-74, 3-76
Derivaciones, medidores en anillo, 5-63
Descarga, corriente, 3-103
Descarga, trayectoria, 3-103, 3-104
Deslizamiento en motor de inducción, 7-118
Desmagnetización de un imán, 1-71
Despolarización, 6-10
Devanado con derivaciones, 3-89
Devanado primario, 3-71, 3-73, 3-74
Devanados de armadura, 6-86, 6-99, 6-101, 6-132
Devanado de arranque, 7-96, 7-97
Devanados
armadura, 6-86, 6-101, 6-132
compensadores, 6-95
de ancas de rana, 6-86
de armadura combinada, 6-133
de campo, 6-75, 6-77, 6-79, 6-104, 6-120
de campo múltiple, 6-76
derivación, 6-104
interpolos, 6-94
ondulados, 6-86, 6-89, 6-90
serie, 6-104
traslapados, 6-86, 6-87, 6-88

Devanados:
anillo, 7-26
amortiguadores, 7-107, 7-111
armadura de anillo de Gramme, 7-26
auxiliares, 7-96
de arranque, 7-96, 7-97
de campo, 7-35
de operación, 7-96
de rotor trifásico, 7-124
de tambor, 7-26
distribuidos, 7-115
estator, 7-94
interpolos, 7-22
ondulados, 7-27, 7-30, 7-31
traslapados, 7-27, 7-28, 7-29
Devanados amortiguadores, 7-107, 7-111
Devanados de anillo, 7-26

Devanados de campo, 6-75, 6-77, 6-79, 6-104, 6-120, 7-35
ver también devanados distribuidos
Devanados de estator, 7-94
Devanados de motor trifásico, 7-124
Devanados de operación, 7-96
Devanados de rango múltiple, 5-61
Devanados en derivación, 6-104
Devanado en serie, 6-104
Devanados imbricados, 6-86, 6-87, 6-88, 7-27, 7-28, 7-29
Devanados ondulados, 6-86, 6-89, 6-90, 7-27, 7-30, 7-31
Diagrama base para capacitores, 3-124
Diagrama base para inductores, 3-66
Diagrama base para resistencia, 3-34
Diagrama para resistencias, 2-38
Diagramas de vectores, 4-23
Dieléctrica, constante, 3-114
Dieléctrica, intensidad, 3-114
Dieléctricos, 3-109, 4-56
aire, 3-114
material, 3-135
ruptura, 3-136
vacío, 3-114
Dieléctricos en el vacío, 3-114
Diferencia de fase, 3-26, 3-120
Diferencia de potencial, 1-55, 2-45, 2-65
Ver también: Voltaje
Diferencial-combinación, motores, 7-65, 7-67, 7-69
Dinamotores, 6-136
Directa, corriente, *ver* Corriente continua
Disipación de potencia, 2-48
Disposiciones de multiplicador serie, 5-84
Dispositivo de igualadores largos, 7-128
Dispositivo de saltadores cortos, 7-128
Distribuidos, devanados, 7-115
Distribuidos, devanados de campo, 7-35
Distribuidos, polos, 7-112
División de fase, 7-96
Doble jaula de ardilla, 7-122
Dominios magnéticos, 1-68

E

Ecuación derivada de anillo medidor, 5-64, 6-65
Edison, celda de, 6-49
Edison, Thomas A., 6-44
Efectiva, resistencia, 2-86, 2-104, 2-111, 2-112
Efectiva, resistencia interna, 2-120
Efectivos, valores, 3-30, 3-31
Efectos magnéticos de la electricidad, 7-2
Efecto superficial (skin effect), 3-37, 3-38
Efecto superficial, 5-47
Efecto triboeléctrico, 1-38
Eficiencia, 7-52, 7-53
Eléctricas, unidades, 2-54
Electricidad:
estática, 1-45, 1-51
efectos magnéticos, 7-2
movimiento de, 7-2
Electrodeposición o galvanoplastia, 1-60
Electrodo negativo de celda de plomo-ácido, 6-28
Electrodos, 1-60
Electrodos, 6-6, 6-7, 6-12, 6-32
Electrodos, placas, 6-41
Electroimanes, 1-86, 1-87, 7-2
Electroimanes, 6-63, 6-73, 5-4
Electrólisis, 1-60, 6-29
Electrolítica, pasta, 6-15
Electrólitos, 1-39
Electrolíticos, capacitores, 3-137, 3-138
c-a, 3-138
tipo húmedo, 3-138
Electrólito "hervor", 6-31
Electrólitos, 3-137, 6-6, 6-11, 6-37, 6-39
celda alcalina, 6-44
celda de plomo-ácido, 6-29
nivel, 6-42
reducción, 6-35
Electroluminiscencia, 1-63
Electromagnetismo, 1-81, 1-82, 1-85, 1-86, 3-42, 5-4
Electromotriz, serie, 6-12
Electrones, 1-3, 1-9, 1-12, 2-8, 2-12
libres, 1-34, 1-35, 1-45, 1-46, 1-47, 1-48
Electroquímica, 1-39, 1-60
Electrostática, fuerza, 3-100
Electrostáticas, cargas, 1-14
Electrostáticas, líneas de fuerza, 1-21
Electrostáticos, campos, 1-21, 3-98, 4-84
Elektron (electrón), 1-2
Elemento calefactor, 1-92, 2-124
Elementos, 1-5
artificiales, 1-5
estables, 1-31
naturales, 1-5
Elementos estables, 1-31
Elevadores, conmutador, 6-102, 7-32
Elevadores técnicos, 6-106
Encadenamiento de flujo, 3-72
Enchufe de filtro, 6-41
Energía, 2-4, 2-44, 2-54, 2-97
Energía eléctrica, 3-73
Energía electrónica, 1-28
Energía mecánica, 7-2
Energía, fuente de, portátiles, 6-3
Energía, fuentes de, 2-2, 2-4
fallas, 2-122
resistencia interna, 2-120
Enfriamiento,
generadores, 6-106
motores, 7-37
Equipo de prueba, 5-1
Escala completa, oscilación, 5-39, 5-86, 5-90
de ohmímetro en serie, 5-94
Escala de ley cuadrática, 5-35

Escalas, 5-10, 5-11
ley cuadrática, 5-35
lineales, 5-29
no lineales, 5-30
para medidores de bobina móvil, 5-29
para medidores de hierro móvil, 5-30
para medidores de termopar, 5-35
Escalas no lineales, 5-30
Espiras, 6-63, 6-69, 6-70, 6-71
Estabilidad, 2-29
Estator, arranque por capacitor, 7-97
Estator, de dos polos, 7-103, 7-104
velocidad síncrona, 7-103, 7-104
Estatores, 6-132
Excitador interno, 6-132
Exponencial, forma de onda, 3-58, 3-60

F

Factor de potencia, 3-134, 4-35, 4-49, 4-61, 4-84, 5-107, 6-127, 6-130, 6-131
Farad, 3-105, 3-110
Faraday, Michael, 3-57
Faraday, motor de, 7-3
Fase, 3-25
de circuitos c-a resistivos, 3-35
voltaje, 6-127, 6-128
Fase, ángulos de, 3-25, 3-56, 4-2, 4-30
en circuitos en paralelo RC, 4-75
en circuitos en paralelo RL, 4-53
en circuitos en serie RC, 4-75
en circuitos en serie, RL, 4-53
Fem autoinducida, 3-48
magnitud, 3-48
polaridad, 3-48, 3-49, 3-50
Ferromagnéticos, materiales, 1-69
Filamento, 1-91
Filamento, 2-49, 2-50
Filtrado, 6-70
Flecha de armadura, 6-99
Flecha de armadura, 7-25
Fluctuante, 6-68
Fluctuante, corriente continua, 3-20, 3-21
componente c-a, 3-21, 3-131
nivel de referencia, 3-131
Fluctuantes, formas de onda c-c, 3-20
Fluctuante voltaje de c-c, 6-69
Flujo, 6-62
Flujo magnético, 6-63
Fluorescencia, 1-63
Fmm, *ver*
fuerza magnetomotriz
Forma, devanados con, 6-101
Formas de onda,
c-a, 3-12, 3-13
c-a vs. c-c, 3-13
c-c, 3-13
cuadrada, 3-16, 3-17, 5-41
dientes de sierra, 3-16, 3-19, 5-41
exponencial, 3-58
potencia, 3-36
tensión para circuitos en serie RC, 4-58
tensión para circuitos en serie RL, 4-31
tensión para circuitos en serie LC, 4-81
tensión para circuitos en serie LCR, 4-92
Formas de onda c-a, 3-12
simetría, 3-12
Formas de onda de tensión,
en circuitos en serie LC, 4-81
en circuitos en serie LCR, 4-92
en circuitos en serie RC, 4-58
en circuitos en serie RL, 4-31
Formas de onda no sinusoidales, 5-41
Fosforescencia, 1-63
Fotoconducción, 1-42
Fotoemisión, 1-42
Fotones, 1-42
Fotovoltaicas, celdas, 6-57, 6-58
Fotovoltaico, efecto, 1-42
Fraccionales:
motores síncronos, 7-108, 7-129
Fraccionales, motores de serie de c-a, 7-139
Frecuencia, 3-23, 3-48, 5-41, 6-119
efecto de la corriente en un capacitor, 3-121, 3-122
efecto sobre las corrientes circulantes, 3-38
respuesta de, 5-49
Frecuencia de resonancia, 4-97, 4-102, 4-129
Frecuencia normal de potencia, 3-23
Fricción electrostática efectos, 1-38
Fricción, triboelectricidad, 1-16
Frotamiento, carga por, 6-40
Fuente de c-c, 2-6
Fuente de energía, 1-53
Fuente excitadora, 6-77
de c-c, 6-132
interna, 6-132
Fuente excitadora, armadura, 6-130
Fuente excitadora corriente de campo, 6-130
Fuentes de tensión, 2-5
Fuentes de energía en oposición, en serie, 2-60
Fuentes de energía en paralelo, 2-88
Fuentes de energía en serie, 2-58, 2-59
Fuerza contraelectromotriz (fcem), 3-50, 3-52, 3-57, 3-65, 4-23, 7-43, 7-45, 7-46
Fuerza de atracción, 1-18
Fuerza de repulsión, 1-18
Fuerza electromotriz (fem), 1-56, 2-5, 2-16, 3-48, 3-50, 4-23, 7-43, 7-45, 7-46
Fuerza magnética, 1-76
Fuga de líneas de flujo, 3-91
Fusibles, 1-54
Fusibles, 2-67, 2-69, 2-125

G

Galvani, 5-10

Galvánica, celda, 6-6
Galvánica, serie, 6-12
Galvanoplastia, 1-60
Galvanómetro, 5-10, 5-103
Gases inertes, 1-31
Generador eléctrico, 7-3
Generadores: 1-99, 6-61, 6-62
armadura, *ver* armaduras
c-a, 6-62, 6-115, 6-116
c-c, 2-122, 6-62, 6-63, 6-134
combinados, 6-82, 6-83
comparación de c-c y c-a, 6-133
con derivación, 6-80, 6-81
conexión interpolos, 7-42
devanados de campo, *ver*, devanados
enfriamiento, 6-106
reacción de armadura, *ver*, armadura, reacción de
regla de la mano izquierda, 7-40
Generadores autoexcitados, 6-77, 6-78, 6-80
arranque, 6-84
Generadores de c-a, bifásicos, 6-124
Generadores de c-a, monofásicos, 6-123
Generadores de c-a, trifásicos, 6-125
Generadores de c-a, de armadura estacionaria, 6-121, 6-122
Generadores de dos polos, 6-101, 6-104
Generadores con derivación, 6-80, 6-81
Generadores excitados separadamente, 6-77, 6-120
Generadores en serie, 6-78, 6-79
Generadores en serie con derivación, *ver*, generadores combinados
Generadores combinados, 6-83
Generadores, polarizados, 6-65
Generador, voltaje, de salida de, 6-130
Germanio, 1-33, 1-142
Grados de rotación, 312
Gramme, devanados de armadura de anillo de, 7-26
Grasa, accesorios de engrase, 7-36, 7-37
Grasa, embudo para, 6-106

H

Henry, 3-57
Henry, Joseph, 3-57
Hierro, imanes de, 5-4
Hierro, limaduras, 1-77
Hierro medidores de paleta, 5-40
Hierro móvil, medidores de, 5-9, 5-11, 5-13, 5-17, 5-20, 5-23, 5-24
álabes concéntricos, 5-11, 5-12, 5-21, 5-22
amortiguamiento, 5-34
escalas, 5-30
paleta radial, 5-11
vástago, 5-11, 5-13
Hierro, núcleo de, 1-87
Hidrómetro, 6-39
compensación de ajuste
Histéresis, ciclo, 3-93
Histéresis, efectos de, 7-130
Histéresis, motores de, 7-130, 7-131
Histéresis, pérdidas por, 3-91, 3-93, 7-25
del núcleo, 6-100

I

Ideales, transformadores, 3-79
Imán permanente, 1-70, 5-19, 6-63, 6-73
Imán temporal, 1-70
Impedancia, 4-26
en circuitos en paralelo LC, 4-119
en circuitos en paralelo LCR, 4-128
en circuitos en paralelo RC, 4-72, 4-75
en circuitos en paralelo RL, 4-48, 4-53
en circuitos en serie LC, 4-82
en circuitos en serie LCR, 4-93, 4-94
en circuitos en serie RC, 4-59, 4-75
en circuitos en serie RL, 4-53
voltímetro, 5-86
Impedancia, balanceo de, 4-153, 4-154
Impedancia, circuito, 4-64
Impedancia frecuencia, curva de, 4-136, 4-140
Impedancia y corriente, 4-32, 4-33, 4-34
Impulso eléctrico, 1-49
Incandescente, lámpara, 1-63, 1-90
Inducida fem, 3-44, 3-45
factores, 3-45
Inducción, electrostática, 1-18, 7-114
mutua, 3-74
Inducción magnética, 6-61, 7-114
Inducción, motores de, 7-114
arranque por capacitor, 7-115
construcción, 7-115, 7-116
de fase dividida, 7-115
de polo de sombra, 7-115
deslizamiento, 7-118
doble jaula de ardilla, 7-122
jaula de ardilla, 7-116
jaula de ardilla de velocidad múltiple, 7-125
par de funcionamiento, 7-120, 7-121
par de sentado, 7-121
polifásicos, 7-115
rotor devanado, 7-123, 7-124
Inductancia, 3-42, 3-54, 3-61, 3-65, 4-1
en circuitos c-c, 3-42, 3-54, 3-61, 3-65, 4-1
mutua, 3-61, 3-72
valores, 3-57
Inductiva, reactancia, 4-33
Inductancia variable, 3-55
símbolo, 3-55
Inductiva, corriente
vs. frecuencia, 3-65
vs. inductancia, 3-65
Inductiva, constante de tiempo, 3-61
Inductiva, reactancia
vs. frecuencia, 3-65

vs. inductancia, 3-65
Inductivamente compensados, motores de serie de c-a, 7-138
Inductivos, circuitos, 3-97
corriente, 3-63, 3-64, 4-2
tensión, 3-63, 3-64, 4-26
vectores, 4-18, 4-21
Inductivos, circuitos c-a, 3-62
Inductores, 5-103
Inductores, 3-54, 3-55, 3-60
fijos, 3-55
núcleo de aire, 3-55
paralelo, 3-67
serie, 3-67
variable, 3-55
Inductores con núcleo de aire, 3-55
símbolo, 3-55
inductores de núcleo de acero, símbolo, 3-55
Inductores en paralelo, 3-67
Inductores en serie, 3-67
Inductores fijos, 3-55
Inercia, 7-9
Inertes, gases, 1-31
Instantánea, potencia, de circuitos resistivos, 3-36
Instantáneos, valores, 3-28
Instrumentos, 1-98
Intensidad de campo, 7-6
Interna, caída de tensión, 2-122
Interna, resistencia, 2-120
de fuentes de potencia, 2-120
de generadores, 6-136
de un medidor, 5-38
efectiva, 2-102
Internos, corto circuitos, 2-122
Interpolo, alambrado
generadores, 7-42
motores, 6-94, 7-42
Interpolos, devanados, 6-94, 7-22
Interruptores, 1-95, 2-3, 2-67, 2-68, 2-69, 2-125, 3-115
Interruptores electromagnéticos, 1-94
Interruptores electromagnéticos, 1-94
Inversión de dirección de campo rotatorio de fase dividida, 7-96
Inversión de motores de capacitor, 7-97
Inversión de motores de derivación, 7-63
Inversión de motores de serie c-c, 7-62
Inversión de rotación, 7-61
Iones, 1-15, 1-39
Iónica, unión, 1-32
I^2R calefacción, 2-48, 2-49, 2-50, 2-51

J

Joule, 2-45

K

Kilociclos, 3-23
Kilovolts, (kv), 1-56
Kirchhoff, Leyes de, 2-113
Kirchhoff, Gustav, 2-114
Kiloohms, 2-16, 2-54
Kilovolts, 2-54
Kilowatts, 2-54
Kilowatt-horas, 2-52
aplicación, 2-118
ley de corriente, 2-117
ley de tensión, 2-115, 2-116
principio de superposición, 2-119

L

Laminaciones, 3-93, 6-99
Laminados, núcleos de hierro, 6-132
Laminadas, piezas polares, 6-104
Lámpara incandescente, 1-91
Leclanché, celda de, 6-16
estructura, 6-18
LCR, ángulo de fase, 4-2
LCR, circuitos, 4-77
en paralelo, 4-123
en serie, 4-89
Lenz, Ley de, 3-47, 3-64, 7-43, 7-44
Línea, corriente de, 4-45, 4-46, 4-48
en circuitos RC en paralelo, 4-69, 4-70
Línea de transmisión, 3-5, 3-6
Líneas de flujo, 1-77, 1-78, 1-82, 1-83, 1-84, 1-86, 1-87, 1-96, 3-47, 3-48, 3-52, 3-94, 7-3, 7-4
fugas, 3-91
Líneas de fuerza, 1-78, 1-96
Líneas de fuerza, 7-3, 7-6
Líneas de fuerza eléctrica, 1-11, 1-12
Línea, voltaje, de, 6-127, 6-128
Litio, 1-42
Longitud de onda, 3-24
Luz, 1-42, 1-63

M

Magnético, circuito, 6-75
Magnetismo, 1-43, 1-63, 1-66
atracción y repulsión, 1-75, 5-4
el electrón y, 1-66
líneas de fuerza, 1-77
Magnetismo residual, 6-84
Magnetita, 1-66
Magnetoelectricidad, 1-43
Magnetomotriz, fuerza, 1-88
Magnetos, 6-73
Manganana, 2-24
Mano izquierda, regla de la, 1-82, 1-86, 1-99, 7-4, 7-5
conductor con corriente, 3-43
generadores, 6-64
Marcos de campo, 7-36
Masa de giración, 1-72
Materia, 1-4

Materiales magnéticos, 1-69
Media onda, medidor rectificador de, 5-45
Medidores, 5-17
álabes concéntricos, 5-12, 5-21, 5-22
amortiguamiento, 5-32, 5-34
amperímetro de abrazadera, 5-75
amperímetro térmico, 5-14, 5-15
bobina móvil, tipo rectificador, 5-40
c-a, 5-40
c-c, 5-40
compensados, 5-109
conexiones de circuito, 5-72
corriente, 5-3
corriente electromagnética, 5-9
corriente de alcance múltiple, 5-60, 5-63
corriente térmica, 5-3
d'Arsonval, 5-18
de paleta radial, 5-21, 5-22
de potencia, 5-106, 5-107, 5-1-108
derivaciones, 5-61
de tipo vástago, 5-13
de tipo rectificador, para corriente, 5-75
escalas, 5-29, 5-30
hierro móvil, *ver* medidores de hierro móvil
multímetros, 5-109
ohmímetros en serie de alcance múltiple, 5-98, 5-99, 5-100
paleta de hierro, 5-40
rectificador de media onda, 5-45
rectificador de onda completa, 5-46
resistencia, *ver* ohmímetros
resistencia interna, 5-38
termopar, 5-15, 5-17, 5-40, 5-47
Medidor de álabes concéntricos, 5-12, 5-21, 5-22
Medidor de hierro móvil de tipo de repulsión, 5-6
Medidor de paleta radial, 5-11, 5-21, 5-22
Medidor de resistencia de, 5-86, 5-93
Medidor de precisión, 5-39
Medidor, de termopar, 5-15, 5-17, 5-40, 5-47
escala, 5-35
Medidor sensibilidad, 5-38, 5-73
Medidor sonda de, 5-114
Medidor térmico de corriente, 5-3
Medidores de cero central, 5-89
Megaciclos, 3-23
Megaohms, 2-16, 2-54
Megavolts, Mv, 1-56
Megawatts, 2-54
Megger, 5-104
Megohmímetros, *ver* Megger
Mercurio, baterías de, 6-20
Mercurio, vapor, 1-63
Metales, 1-30
Metálica, unión, 1-46
Metro, 1-98
Mica, capacitores, 3-135
Mica, separadores de, 7-32
Microamperes, (μA), 2-54
Microamperes μa, 1-57
Microfaradio, 1-88
Microfarads (mf), 3-105, 3-110
Microhenry (mh), 3-57
Micromicrofarads (mmf), 3-105, 3-110
Microvolt ($\mu\sigma$) (mmfd), 1-56
Microvolt (μV), 2-54
Microwatts (μW), 2-54
Miliamperes ma (pfd), 1-57
Miliamperes (ma), 2-57
Milihenry (mh), 3-57
Milivolt (mv), 2-54
Miliwatt (mw), 2-16
Moléculas, 1-7, 1-32
Moléculas magnéticas, 1-68, 1-69
Montajes
generador de c-c, 6-105
Motogenerador, 6-137
Motor, acción, 7-4, 7-117
reglas, 7-5
motor, 7-36
Motor, clasificación, 7-52, 7-53
caballaje, 7-52
potencia de entrada, 7-52
potencia de salida, 7-52
Motor, cubierta de, 7-25
Motor de arranque, 7-109
Motor de caballaje constante, 7-128
Motor compound acumulativo de derivación corta, 7-65
Motor de inducción de polo de sombra, 7-115
Motor de par variable, caballaje variable, 7-128
Motor, eficiencia, 7-52, 7-53
Motor, mantenimiento, 7-24
Motor, regulación de velocidad de, 7-47, 7-48, 7-49
Motores, *ver también* tipos específicos de motores
armadura, reacción de, 7-20, 7-21, 7-41
arranque por capacitor, 7-97
de c-a, 7-89
caballaje constante, 7-128
de c-a, c-c, 7-89
de c-a, de conmutador, 7-132
de c-a, fase dividida, 7-96
de c-a, de serie, 7-132, 7-136, 7-137
coexiones entre polos, 7-42
comparación con c-c, 7-68
compound acumulativo, 7-69
compound diferencial, 7-67, 7-69
compound, 7-64, 7-75
comparación con generadores, 7-39
eficiencia, 7-52
elementales de c-c, 7-10
enfriamiento, 7-37
entrada de potencia, 7-52
fraccionales, serie de, 7-139
fraccionales, síncronos, 7-129
histéresis, 7-130, 7-21
inducción, 7-114

inducción, arranque por repulsión, 7-132, 7-134
inducción, jaula de ardilla, 7-129
par variable, caballaje variable, 7-128
polo de sombra, 7-99
prácticas, 7-6
reluctancia, 7-129
regla de la mano derecha, 7-40
repulsión, 7-132
salida de potencia, 7-52
serie, 7-69
serie de derivación, 7-66
síncronos, 7-106, 7-129
trifásicos, 7-101
universales, 7-89, 7-139
Motores de c-a, c-c, 7-89
Motores de c-a de fase dividida, 7-96
Motores de c-c elementales, 7-10
desventajas, 7-12, 7-13
Motores compound acumulativos con derivación larga, 7-65
Motores de c-a con conmutador, 7-132
Motores de inducción de arranque por repulsión, 7-132, 7-134
Motores de inducción de fase dividida, 7-115
Motores de inducción de jaula de ardilla, 7-116, 7-119, 7-129
clases, 7-119
Motores de inducción de rotor devanado, 7-123, 7-124
Motores de polo de sombra, 7-99
Motores de reluctancia, 7-129
Motores de repulsión, 7-132
funcionamiento, 7-133
Motores de derivación,
arrancador de contacto cuádruple, 7-76
arrancador de contacto triple, 7-72, 7-73
características, 7-54
control de velocidad
desboque, 7-56
reversa, 7-63
Motores eléctricos, 1-96
Motores eléctricos, 7-1
Motores polifásicos de inducción, 7-115
Motores de serie, 7-69
arrancador de contacto doble, 7-75
arrancador de contacto triple, 7-74
característica a velocidad de carga, 7-57
característica de par, 7-59
característica sin carga, 7-58
desboque, 7-58
reversa, 7-62
Motores repulsión inducción, 7-132, 7-135
Motores síncronos, 7-106, 7-129, 7-130
arranque, 7-109
como capacitores rotatorios, 7-110
construcción, 7-111, 7-112
fraccionales, 7-108
trifásicos, 7-108
Motores síncronos trifásicos, 7-108
Motores trifásicos, 7-101
Motores universales, 7-89, 7-139
Movimiento, por electricidad, 7-2
Multimedidor electrónico, ver voltímetros de tuvo al vacío
Multímetros, 5-109
electrónicos, *ver*, voltímetros de tubo al vacío
escala, 5-111
interruptores selectores, 5-110
rangos, 5-111
Múltiple, motor devanado, 7-125
Múltiples, armaduras, 7-14
Múltiples, baterías de celdas, 6-51
Múltiples, devanados de campo, 6-76
Múltiples, transformadores de secundario, 3-83
Multiplicadoras, resistencias, 5-82
voltímetro, 5-84
Mutua, inducción, 3-67, 3-71, 3-73, 3-74
Mutua, inductancia, 3-71, 3-72

N

Natural, imán, 1-66
Neón, 1-63
Neutrones, 1-9
Nicromel, 1-62, 1-92
Níquel-cadmio, celdas, 6-44, 6-49
Níquel-hierro, celdas, 6-49
Nivel de energía, 1-28
N (norte), polo, 1-73
Nonelectriks (no eléctricos), 1-2
Núcleo de aire, 3-45
Núcleo de hierro dulce, 5-19
Núcleos, 1-9, 1-10, 1-22
aire, 3-45
aislamiento, 3-45, 3-50
de hierro laminado, 6-132
magnéticos, 3-45
pérdidas por histéresis en, 6-100
saturados, 3-45
Núcleo, saturación de, 3-94
Núcleo saturado, 7-35, 7-111
Núcleos magnéticos, 1-87, 3-47

O

Oersted, Hans Christian, 7-2
Ohm, George Simon, 2-16
Ohmica, resistencia, 3-37
Ohm, Ley de circuitos de C.A., 4-33
para capacitores, 3-124
para inductores, 3-66
para potencia, 2-46
para resistencias, 2-38, 3-34
Ohmímetros, 5-93
derivador, 5-93, 5-96, 5-97
serie, 5-93, 5-94, 5-95

serie de alcance múltiple, 5-98, 5-99, 5-100
uso de, 5-101, 5-102
Ohmímetro con derivador, 5-93, 5-96, 5-97
Ohms por volt, clasificación, 5-86
alto, 5-87, 5-88
de voltímetro de tubo al vacío, 5-112
Omega (ω), 2-16
Onda completa, medidor rectificador de, 5-46
Onda cuadrática, 5-41
Onda cuadrática o cuadrada, 3-16, 3-17, 3-18
generación, 3-18
Ondas diente de sierra, 3-16, 3-19, 5-41
Ondas pulsantes de c-c, 5-44
Onda sinusoidal, ciclo, 4-19
Ondas sinusoidales, 3-14, 5-41
generación, 3-15
puntos máximos, 3-14
puntos mínimos, 3-14
valores efectivos, 3-30, 5-34
valores medios, 3-29, 5-43
valores raíz cuadrática, 5-43
Ondulación, 6-69
Orbitas, 1-9
Orbitas atómicas, 1-25
Orbitas electrónicas, 1-22
Orbitas de valencia, 1-27, 1-30, 1-33
Orificios de aire, 6-106
Orificios de ventilación, 6-41
Oro, 1-34
deposición (depósito), 1-60
Oscilación de escala plena, 5-37
Osciloscopio para medir formas de onda no sinusoidales, 5-41
Oxido de cobre, 1-33

P

Paletas de hierro, 5-21, 5-22
Papel pescado, 7-27
Par, 7-6, 7-47
Par de arranque de motores de inducción, 7-119
Par de arranque de motores de inducción, 7-119
Par de funcionamiento de motores de inducción, 7-121
Paralelo, circuitos resonantes en ancho de banda, 4-144
calidad (Q), 4-141, 4-142, 4-144
corriente, 4-144
frecuencia de resonancia, 4-144
impedancia, 4-144
práctica, 4-137, 4-138, 4-139
propiedades en resonancia, 4-144
propiedades fuera de resonancia, 4-144
reactancias, 4-144
Paralelo, resistencias en, 2-81
desiguales, 2-84
iguales, 2-82, 2-83
Paralelo, resonancia en, 4-117, 4-132
Partes conectadas en paralelo, 2-100
Partes conectadas en serie, 2-100
Paso de banda, 4-105, 4-107, 4-140
amplio, 4-105
angosto, 4-105
Patas de retención, medidor, 5-28
Pérdidas de potencia, 2-48
Pérdida de saturación, 3-94
Pérdidas de cobre, 3-91
Pérdidas de potencia, 3-4, 3-6
Pérdidas de potencia por transmisión, 3-5
Periodo, c-a, 3-27
Permanencia, 3-92
Pescado, papel, 7-27
Picofarad (pf), 3-105, 3-110
Piedra imán (magnetita), 1-66
Pieza polar norte, 6-75
Pieza polar sur, 6-75
Piezas polares, 5-19
Piezas polares, 6-104
laminadas, 6-104
norte, 6-75
sur, 6-75
Piezoeléctrica, carga, 1-61
Piezoelectricidad, 1-40
Pila húmeda, 1-39
Pitágoras, teorema de, 4-10, 4-22, 4-32, 4-45
Pivotes, medidor, 5-10, 5-11, 5-28
Placas de estator, 3-136
Placas de rotor, 3-136
Plano neutro, 5-91, 6-68, 6-93, 7-20, 7-41
desplazado, 6-92, 7-21
eléctrico, 6-93
geométrico, 7-20
Plano neutro, geométrico, 7-20
Plata, 1-34
deposición (depósito), 1-60
Plata-cinc, celdas de, 6-55, 6-49
Plomo-ácido, celdas de, 5-25, 6-24
cargadas, 6-32
descarga, 6-36, 6-37, 6-38
electrodo negativo, 6-27
electrodo positivo, 6-28
electrólito, 6-29
totalmente cargadas, 6-30
Plomo, sulfato de, 1-42
Polaridad, 2-64, 5-72
de una fuente de tensión, 2-5
de un punto, 2-65
Polaridad, 5-72
Polaridades magnéticas, 1-73
Polarización, 6-10, 6-17
en celdas secas, 6-17
Polo Norte, (polo NO), 1-42
Polos
distribuidos, 7-112
saliente, 7-35, 7-111
Polos cubiertos, 7-99
Polos salientes, 7-35, 7-111
Porcentaje de error en medidores, 5-39, 5-90

Portaescobillas, 6-103, 7-33
Positiva, coeficiente de temperatura, 2-15
Potasio, 1-42
Potencia, 2-49, 5-107
aparente, 4-49, 5-107, 6-131
aparente, en circuitos en serie RL, 4-35
cálculo, 5-106
efecto de la frecuencia, 4-60
en circuitos en paralelo RC, 4-75
en circuitos en paralelo RL, 4-49, 4-53
en circuitos en serie LC, 4-83
en circuitos en serie LCR, 4-96
en circuitos en serie RC, 4-75
en circuitos en serie RL, 4-35, 4-53
en circuitos resistivos, 3-36
formas de onda, 3-36
medición, 5-108
primaria, 3-79
real, 3-134, 4-35, 4-49
secundaria, 3-79
Potencia, c-a, 3-1, 3-3
distribución, 3-73
transmisión, 3-6
Potencia de c-a bifásica, 7-100
pérdidas de transmisión, 3-5
transmisión, 3-4
Potencial, 1-56
Potencial, actividad química, 6-32
Potencial, diferencia de, 1-55, 2-45, 2-65, 6-2
ver también tensión, voltaje
Potencial eléctrico, 1-55
Potencial negativo, 6-33
Potencial positivo, 6-34
Potencial real, 6-127, 6-128
Potencia media en circuitos resistivos, 3-36
Potencia pico en circuitos resistivos, 3-36
Potencia polifásica, 7-101
Potencia primaria, 3-79
Potencia real, 3-134
Potencia real, 4-49, 4-84
en circuitos en serie RL, 4-35
Potencia secundaria,
transformador, 3-79
Potenciómetro, 2-33
Potenciómetro, circuito, 2-66
Precisión
medidores, 5-39
medidores de c-a, 5-48
medidores de c-c, 5-48
voltímetro de tubo al vacío, 5-113
Presión de resorte, 6-103
Presión, efectos eléctricos de la, 1-39, 1-61
Principio de superposición, 2-119
Prony, freno de, 7-52
Protección contra no-carga, 7-75
Protones, 1-3, 1-9, 1-11
Punto de saturación, 1-88
Punto resonante, 4-147
Puntos de prueba, 5-102
Puntos de referencia, 5-102

Q

Química, actividad, 1-60
Química, energía, 6-3
Química, estabilidad, 1-31

R

Radio, 3-11
Rama, corriente de, 2-78, 2-79, 2-80, 2-106, 2-108
en circuitos en paralelo RC, 4-68
en circuitos en paralelo RL, 4-44, 4-68
Rango, interruptor de, 5-60, 5-98
Rápida, carga, 6-40
Recargadores de batería, 6-21
Rectificadores
alternador, 6-135
RC circuitos, 3-134, 3-142, 4-55
en paralelo, 4-66
en serie, 4-56
Reactancia
capacitiva, 3-124, 3-125
inductancia, 3-65, 3-66
Reactancia capacitiva, 4-59
Reactancia neta, 4-128
Recíprocos, cálculos de circuitos paralelos, 2-85, 2-95, 3-67
Rectificadores, 5-44
cristal, 5-144
óxido de cobre, 5-44
Rectificadores de selenio, 5-44
Rectificadores, medidores con, 5-40, 5-75
media onda, 5-45
onda completa, 5-46
Referencia de fase, 4-56, 4-60
Referencia de grado cero en circuitos en paralelo RL, 4-43
en circuitos en serie RL, 4-30, 4-34
Regla de la mano derecha, 1-96, 7-4, 7-5
motores, 7-40
para fem inducida, 3-49
Regulación, 6-73
generadores de velocidad variable, 6-107
Regulación combinada para generadores de c-c, 6-113
Regulación de generadores de velocidad variable, 6-107
Regulación de voltaje
generadores de c-a, 6-130
generadores, c-c, 6-78, 6-82, 6-108, 6-109
Reguladores de voltaje, 6-96, 6-113, 6-134
Relación de fase, 4-1
Relación de vueltas, 3-88
vs, corriente, 3-80, 3-81, 3-82
vs. tensión, 3-141
Relevador de corte de corriente inversa, 6-111, 6-112, 6-113
Relevadores o Relés, 1-94
Reluctancia, 1-79, 1-87

Reóstato, 2-33, 2-41
Repulsión, 1-20, 1-21, 5-6
Resistencia, 2-10, 2-11, 2-12, 2-13, 2-14, 2-15, 2-16, 2-17, 2-18, 2-19, 2-20, 2-47, 2-50, 2-97
de la carga, 2-2
de la fuente de energía, 2-20
del circuito total, 2-21, 2-57
de los alambres de un circuito, 2-20
de un alambre, 2-17, 2-18, 2-19
equivalente, 2-112
interna, 2-20, 2-21, 2-120
mediciones de, 5-101
vs. banda de resonancia, 4-106, 4-107
Resistencia, código de color de, 2-34, 2-35
Resistencia de fuga, 3-126
Resistencia, ecuaciones para potencia, 2-47
Resistencia en derivación, 5-54
cálculo, 5-55
Resistencia, equivalente, 2-112
Resistencia, fallas en, 2-123
Resistencia, probadores de voltaje, de – en derivación, 6-53
Resistencia, tipos, 2-27
Resistencia, total, 2-81, 2-86, 2-94, 2-95
Resistencia total de un circuito, 2-21, 2-57
Resistencia, 2-23, 2-24, 2-67
ajustables, 2-32, 2-123
composición, 2-27, 2-28, 2-29
fija, 2-31, 2-34, 2-123
película, 2-27, 2-30
variable, 2-33, 2-34, 2-35
Resistencias ajustables, 2-32, 2-123
Resistencias con derivaciones, 2-31, 2-32
Resistencias de alambre devanado, 2-27, 2-29
tipo potencia, 2-29, 2-34
tipo precisión, 2-29, 2-34
Resistencias de película, 2-27, 2-30
Resistencias de película delgada, 2-30
Resistencias fijas, 2-31, 2-123
Resistencias iguales en paralelo, 2-82, 2-83
Resistencias variables, 2-33, 2-34, 2-123
Resistivos, circuitos, 4-2, 4-26
Resistivos, circuitos c-a, 3-33
potencia, 3-36
potencia instantánea, 3-36
potencia media, 3-36
potencia pico, 3-36
vectores, 4-18, 21
Resonancia, 4-83, 4-102
Resonancia en serie, 4-101
Resortes, 5-25
Retentividad magnética, 7-131
RL, circuitos, 3-97, 3-134
comparación de circuitos en serie y en paralelo, 4-53
efecto de la frecuencia, 4-50
en paralelo, 4-41, 4-45, 4-46
en serie, 4-27, 4-28
impedancia, 4-26
Rochelle, sales de, 1-40, 1-61
Rotación
grados de, 3-12
inversión de dirección, 7-61
Rotación, movimiento de, 7-1, 7-6
Rotor de jaula de ardilla, 7-116
Rotores, 1-96, 1-99, 3-9, 3-97, 3-134, 6-71, 6-122, 7-6, 7-25
de serie, de derivación, motores, 7-66

S

Salida sinusoidal de generadores de c-a, 6-118
Saturación magnética, 6-76, 6-79
Sedimento, área de, 6-42
Selectores, interruptores, 5-110
Selenio, 1-33, 1-42
Semiconductores, 1-33
Sensibilidad, 5-38, 5-73
de un circuito de voltímetro de tubo al vacío, 5-113
de voltímetro, 5-86
Señalador, instrumento, 5-10, 5-11, 5-24
Serie, cargas en, 2-56, 2-57
Serie, circuitos LCR en, 4-89
corriente, 4-95
efecto de la frecuencia, 4-97
formas de onda de tensión, 4-92
impedancia, 4-93, 4-94
potencia, 4-95
tensión, 4-90, 4-91
Silicio, 1-33
Sobrecarga, 6-30
Sobrecargas, 1-94
Sobrecombinado
generador, 6-83
Sodio, 1-42
Solenoide, 1-86, 1-98, 5-5, 5-6
Sondas de r-f, 5-114
Spin del electrón, 1-68, 1-81
Suelto, acoplamiento, 3-72
Sulfatación, 6-42
Superficie de contacto, 6-100
Suma de vectores, 4-6, 4-7, 4-31
por el método del paralelogramo, 4-8
por el método del triángulo, 4-9
por el método del triángulo rectángulo, 4-10, 4-11, 4-12
resta de vectores, 4-32
Suma vectorial, 4-32
S (sur), polo, 1-73

T

Tambor, armadura con devanado de, 7-27
Tambor, controles de, 7-83
funcionamiento en reversa, 7-86
funcionamiento eléctrico, 7-85
funcionamiento mecánico, 7-84
Tambor, devanados de, 7-26

Tambor, núcleo, 6-86
Temperatura, coeficiente de, 2-15
Temperatura, efecto sobre los aisladores, 1-33
Tensión de excitación, 7-108
Tensión de fuente, 2-72
Tensión de resorte, 5-8
Tensiones de transformador, 4-150
Tensión primaria, 3-74
Tensión secundaria, 3-74
  transformador, 3-74
Teoría electrónica del magnetismo, 1-67
Termoelectricidad, 1-41
Termopares, 5-47, 6-58
  contrucción, 5-36
Termopila, 1-41, 6-58
Telsa, Nikota, 7-100
Tierra, campo magnético de la, 1-72
Timbre electromagnético, 1-93
Tolerancia, 2-25
Trabajo, 2-44
Transformadores, 3-6, 3-21
  ajustables, 3-89
  auto, 3-75, 3-77
  corriente, 3-75, 3-77
  de bajada, 3-80
  de subida, 3-80
  efecto de la carga sobre la fase, 3-78
  eficiencia, 3-90
  ideal, 3-79
  inducción mutua, 3-73
  núcleo de aire, 3-86, 3-87
  núcleo de hierro, 3-86, 3-87, 3-91, 3-94
  operación con secundario abierto, 3-74
  operación con secundario cargado, 3-76
  pérdidas, 3-90
  secundario múltiple, 3-83
  símbolos, 3-74, 3-86
  tensiones, 3-75, 3-77
  tipos, 3-85
Transformadores ajustables, 3-89
Transformadores de acoplamiento variable, símbolo, 3-87
Transformadores de bajada, 3-80
Transformadores de núcleo de aire, 3-86, 3-87
  cubierta magnética, 3-87
  símbolo, 3-87
Transformadores de núcleo de hierro, 3-86, 3-87, 3-91, 3-94
  símbolo, 3-87
Transformadores de subida, 3-80
Transmisión de potencia c-a, 3-6
Tubos al vacío, 1-42
Tungsteno, 1-91

U

Unidades
  capacitancia, 3-105
  corriente, 1-57
  frecuencia, 3-23
  inductancia, 3-57
  longitud de onda, 3-24
  medición, 1-55
  potencia, 2-45
  resistencia, 2-16
  tensión, 1-56
Unión electrovalente, 1-32
Uniones
  covalente, 1-32
  iónicas, 1-32
  metálicas, 1-46

V

Valencia, electrones, 1-27, 1-28, 1-30, 1-31, 1-43
Valor de la raíz cuadrática media, 3-30
Valores pico a pico, 3-28, 3-31
Valores promedio, 3-29, 3-31
Valor pico, 3-28, 3-31
Vástago, medidor de hierro móvil, 5-11, 5-13
Vector de referencia, 4-19, 4-30
Vectores, 4-1, 4-3, 4-5
  de circuitos capacitivos, 4-18, 4-21
  de circuitos inductivos, 4-18
  de circuitos de resistencia para, 4-18, 4-21
  referencia para circuitos en serie RL, 4-30
  resultante, 4-9, 4-22
  rotatorios, 4-18, 4-19
  suma por componentes, 4-16, 4-17
Vectores de transformador, 4-150
Vectores de transformador resonante, 4-151, 4-152
Vectores resultantes, 4-19, 4-22
Vectores rotatorios, 4-18, 4-19
Vectores formas de onda, 4-20
Velocidad de la corriente eléctrica, 1-50
Velocidad de la luz, 1-48
Velocidad superior a la normal
  arranque, 7-79
  control, 7-78
  funcionamiento, 7-80
Velocidad múltiple, motores de inducción
  de jaula de ardilla, 7-125
  devanado múltiple, 7-125
  polos consecuentes, 7-125, 7-127, 7-128
Velocidad síncrona, 7-95
  en estator de cuatro polos, 7-105
  en estator de dos polos, 7-103
Ventiladores, 6-100, 7-37
Vernier, ajuste, 3-89
Viga de sujeción, 7-32
Volt, 2-54
Voltaje, 2-54, 2-97, 2-107, 2-108
  ver también: Fuerza electromotriz
  de un punto, 2-65
  capacitor, 3-118, 3-119, 3-120

c-c, fluctuante, 6-69
de línea, 6-127, 6-128
en circuitos en paralelo LC, 4-115
en circuitos en paralelo, RCL, 4-124
en circuitos en paralelo RC, 4-67, 4-75
en circuitos en paralelo RL, 4-43, 4-53
en circuitos en serie, 4-79, 4-80
en circuitos en serie LCR, 4-90, 4-91
en circuitos en serie RC, 4-57, 4-75
en circuitos en serie RL, 4-29, 4-30, 4-53
fase, 6-127, 6-128
salida de generador de c-a, 6-130
salida de generador de c-a, 6-16
secundario, 3-74, 3-76
primario, 3-74
unidades, 1-56
Voltaje normal, 6-3
Voltaje sin carga, 6-53
Voltímetros
conexiones de circuitos, 5-89
escalas, 5-90
impedancia, 5-86
rango múltiple, 5-82
precisión, 5.90
resistencia, 5-91
resistencias multiplicadoras, 5-84
sensibilidad, 5-86
Voltímetros de tubo al vacío, 5-112, 5-113
ohms por volt, clasificación, 5-112
Voltímetro de multiplicador en serie, 5-84

W

Watt, 2-45, 2-46, 2-54
Watímetros, 5-108
pérdida de potencia, 5-109
precisión, 5-107
Watímetros, clasificación de, 5-108
Wheatstone, puente de, 5-103

Z

Zumbador electromagnético, 1-93

——oOo——

ESC. NAUTICA MERCANTE
PROPIEDAD
DE
FERNANDO
"ACERVO"

ESTA OBRA SE TERMINO DE IMPRIMIR EL DIA
21 DE MAYO DE 1985, EN LOS TALLERES DE
OFFSET UNIVERSAL, S. A. de C. V.
AV. AÑO DE JUAREZ, 177-3
GRANJAS SAN ANTONIO 09070
MEXICO, D. F.

LA EDICION CONSTA DE 5,000 EJEMPLARES
Y SOBRANTES PARA REPOSICION

KE — 518 — 80